



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

Ющенко К. А., Карасевская О. П., Котенко С. С., Полищук Е. П., Савченко В. С., Задерий Б. А. К вопросу наследования сварными соединениями структурно-ориентированного состояния металлических материалов 3

Шлепаков В. Н. Современные методы исследования, прогнозирования и оценки свойств сварочных порошковых проволок 12

Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Пивторак Н. И. Расчетный алгоритм оценки допустимых размеров непроплавлений в сварных соединениях, работающих при сложном спектре циклических нагрузок 15

Рымар С. В. Оптимизация трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния 21

Корж В. Н., Попиль Ю. С. Получение газопламенного покрытия при использовании водородно-кислородного пламени 25

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Письменный А. С., Полухин В. В., Полухин Вл. В., Полухин Ю. В., Прокофьев А. С., Удовенко В. Г. Изготовление и применение тонкостенных спиральношовных труб 32

Кононенко В. Я. Технология мокрой механизированной сварки при строительстве МЛСП «Приразломная» 37

Блащук В. Е., Шеленков Г. М., Трояновский В. Э. Сварка труб с трубными решетками теплообменных аппаратов из титановых сплавов 40

Машин В. С., Покляцкий А. Г., Федорчук В. Е. Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом 43

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Еремин Е. Н. Устройство для формирования шва при электрошлаковой сварке 50

Лебедев В. А., Постолатий Н. И., Мотрий А. В. Многофункциональный источник сварочного тока 52

Скосягин Ю. А., Лесной А. Б. Информационно-поисковая система «Электроды для дуговой сварки» 53

Новости 57

Патенты в области сварочного производства 60

ХРОНИКА

2-я Международная конференция «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» 62

Пятая международная научно-техническая конференция «Современные тенденции производства труб для магистральных газонефтепроводов в ОАО «Харьковский трубный завод» 64

III Молодежная конференция «Сварка и родственные технологии» 65

Технический семинар на Каховском заводе электросварочного оборудования 67

Международная научно-техническая конференция «Современные технологии металлообработки» 68

ИНФОРМАЦИЯ 70

Разработано в ИЭС 11, 14, 36, 39, 42

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. Yushina
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

Yushchenko K. A., Karasevskaya O. P., Kotenko S. S., Polishchuk E. P., Savchenko V. S., Sadery B. A. On the problem of welded joints inheriting the structure-oriented condition of metallic materials 3

Shlepakov V. N. Modern methods of investigation, prediction and evaluation of properties of flux-cored wires 12

Velikoivanenko E. A., Rozynka G. F., Pivtorak N. I. Calculation algorithm for evaluation of admissible dimensions of lacks-of-penetration in welded joints exposed to a complex spectrum of cyclic loads 15

Rymar S. V. Optimization of transformer with intensive transverse magnetic leakage flows 21

Korzh V. N., Popyl Yu. S. Producing a flame-sprayed coating in use of hydrogen-oxygen flame 25

INDUSTRIAL

Pismenny A. S., Polukhin V. V., Polukhin VI. V., Polukhin Yu. V., Prokofjev A. S., Udovenko V. G. Manufacture and application of thin-walled spirally-welded pipes 32

Kononenko V. Ya. Technology of wet mechanized welding in construction of Prirazlomnaya off-shore platform 37

Blashchuk V. E., Shelenkov G. M., Troyanovsky V. E. Welding of tubes to tubesheets in titanium alloy heat exchangers 40

Mashin V. S., Poklyatsky A. G., Fedorchuk V. E. Mechanical properties of joints on aluminium alloys in consumable and non-consumable electrode welding 43

BRIEF INFORMATION

Eryomin E. N. A device for weld formation in electroslag welding 50

Lebedev V. A., Postolaty N. I., Motry A. V. Multi-functional welding current source 52

Skosnyagin Yu. A., Lesnoy A. B. Information-retrieval system «Electrodes for arc welding» 53

News 57

Patents in the field of welding 60

NEWS

2nd International Conference «Laser technologies in welding and processing of materials» 62

5th International Scientific-Technical Conference «Current tendencies in pipe manufacture for the main gas pipelines in OJSC «Khartsysk Pipe Plant» 64

III Youth Conference «Welding and Allied Technologies» 65

Technical Seminar in the Kakhovka Plant of Electric Welding Equipment 67

International Scientific-Technical Conference «Modern technologies of metal treatment» 68

INFORMATION

Developed at the PWI 11, 14, 36, 39, 42

*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.*



К ВОПРОСУ НАСЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
О. П. КАРАСЕВСКАЯ, канд. техн. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины),
С. С. КОТЕНКО, инж., **Е. П. ПОЛИЩУК**, канд. техн. наук, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук,
Б. А. ЗАДЕРИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности сварки плавлением текстурированных и полученных методом направленной кристаллизации поли- и монокристаллических сплавов молибдена, вольфрама и никеля. С помощью рентгеновских методов исследования получены данные о наследовании структурной и кристаллографической ориентации различных зон сварного соединения. Установлено, что при кристаллизации сварочной ванны в результате эпитаксиального роста кристаллитов металла шва от подложки (поверхности оплавленных зерен зоны сплавления) в металле шва может повторяться кристаллографическая ориентация структурных элементов исходного материала. Подтверждена принципиальная возможность сохранения в сварном соединении кристаллографической ориентации и структурного состояния, близких к основному металлу.

Ключевые слова: молибден, вольфрам, никелевый сплав, поликристалл, монокристалл, текстура, сварное соединение, рентгенографический метод, кристаллографическая и структурная ориентация

Структурно-ориентированные металлические материалы находят все большее применение в современной технике. При сварке плавлением таких сплавов для сохранения требуемого уровня физико-механических характеристик исходного материала уже недостаточно обычных подходов для получения сварного соединения. В этом случае в первую очередь решается задача максимального сохранения в сварном соединении структурного состояния исходного материала. Учитывая, что при однопроходной сварке относительно тонких материалов реализуется двухмерная схема кристаллизации сварочной ванны, а центрами кристаллизации являются оплавленные зерна зоны сплавления, в случае сохранения эпитаксиального роста кристаллитов сварочной ванны становится возможным наследование металлом шва кристаллографической ориентации тех зерен, с оплавленной поверхности которых начинается процесс кристаллизации.

В настоящей работе рассмотрены механизмы формирования структурного состояния сварных соединений, выполненных электронно-лучевой (ЭЛС) и гелиево-дуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом текстурированных поликристаллических молибденовых сплавов, а также никелевых сплавов, полученных методом направленной кристаллизации, монокристаллов вольфрама и никелевого сплава.

Исследуемые материалы вне зависимости от химического состава, исходного структурного состояния или фазового состава целесообразно разделить на две группы. К первой относят поликристаллические материалы, а также текстурированные поликристаллические сплавы, ко второй — мо-

нокристаллы, а также сплавы, полученные методом направленной кристаллизации. В поликристаллическом сплаве достаточно равноосные зерна имеют хаотическое распределение кристаллографических ориентировок (рис. 1, а). Такой материал практически изотропен, при этом его пластичность ниже, а предел текучести выше среднего значения этих величин для отдельных зерен [1]. Исходя из изотропности поликристаллического сплава следует, что уровень физико-механических характеристик его сварных соединений не будет зависеть от направления сварки. Если поликристаллический материал подвергнуть воздействию направленной пластической деформации (например, прокатке), то в нем сформируется определенное структурное состояние, которое может быть определено как структурная и кристаллографическая текстура (рис. 1, б). При этом под структурной текстурой понимают неодинаковое удлинение зерна вдоль направлений, различно ориентированных относительно прокатки, а под кристаллографической — формирование в плоскости листа преимущественно кристаллографических плоскостей и ориентаций. Деформированные прокаткой молибденовые сплавы, исследованные в настоящей работе, имели следующие компоненты кристаллографической текстуры: $(001)[110]$, $\{111\}\langle 112 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. Плотность дефектов текстурированных молибденовых сплавов, деформированных прокаткой, составляла 10^{10} см⁻². Материал, полученный методом направленной кристаллизации (рис. 1, в), имеет несколько достаточно крупных кристаллитов с преимущественной кристаллографической ориентировкой, разделенных высокоугловыми границами. Этот материал представляет собой промежуточное структурное состояние между преимущественно ориентированным поликристаллом и монокристаллом. В исходном состоянии в монокристалле ни-

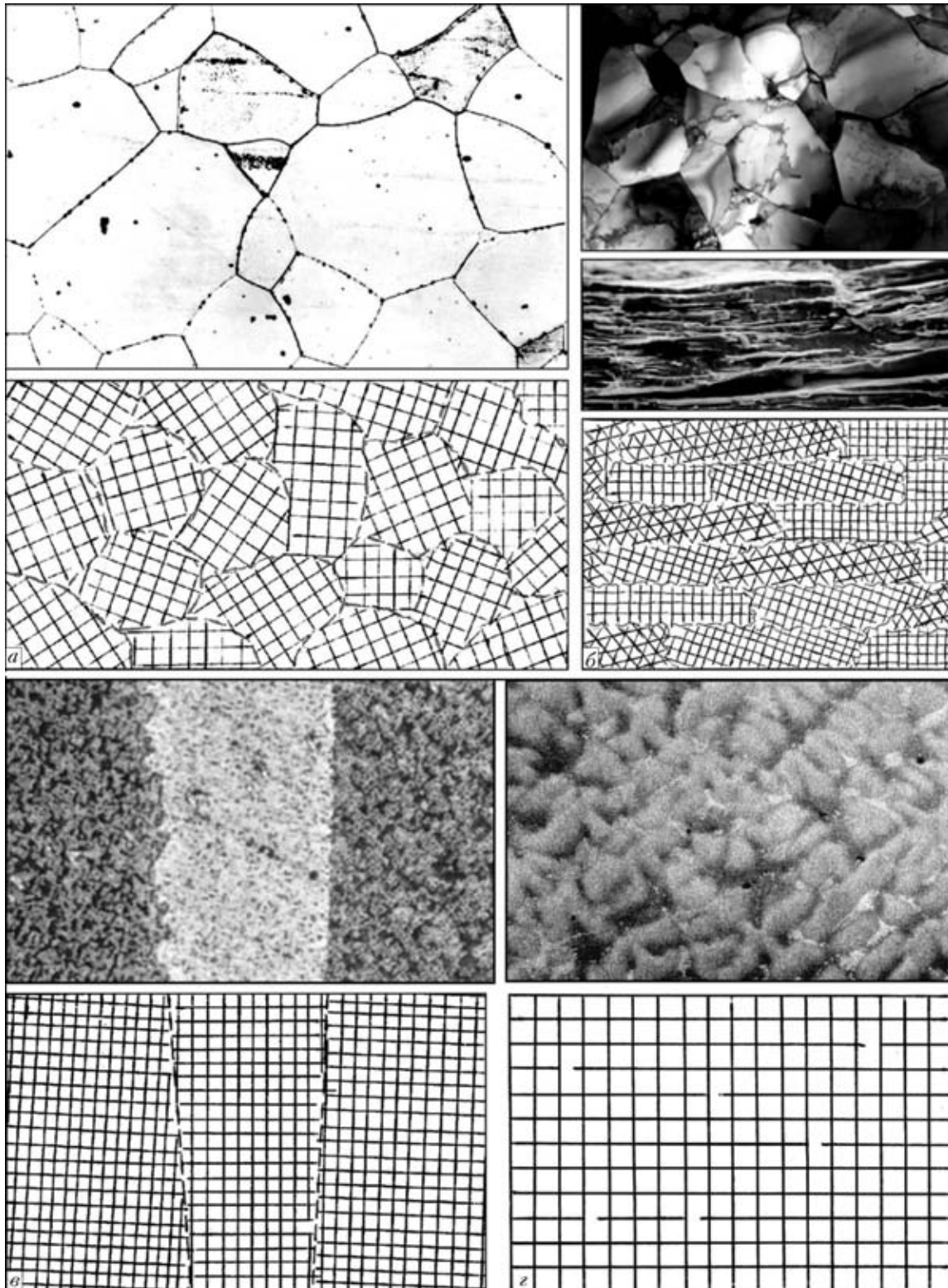


Рис. 1. Микроструктура и схематическое изображение структуры исследуемых материалов: *a* — поликристаллический молибден, $\times 200$; *b* — текстурированный молибденовый сплав, $\times 19000$; $\times 500$; *c* — никелевый сплав, полученный методом направленной кристаллизации; *z* — монокристалл никелевого сплава, $\times 1000$

келевого жаропрочного сплава (рис. 1, *z*) не было обнаружено четко выраженной субструктуры, плотность дислокаций кристаллической решетки не превышала 10^6 см^{-2} .

Основным методом оценки наследования металлом шва структурного состояния исходного материала выбран метод рентгеновской дифракто-

метрии. При этом рентгеновские исследования проводили тремя методиками [2, 3]. Метод построения полюсных фигур использовали для определения кристаллографической ориентации различных зон сварного соединения. При исследовании отдельных участков монокристалла, которые не соответствуют основной ориентации исходного материала, по су-

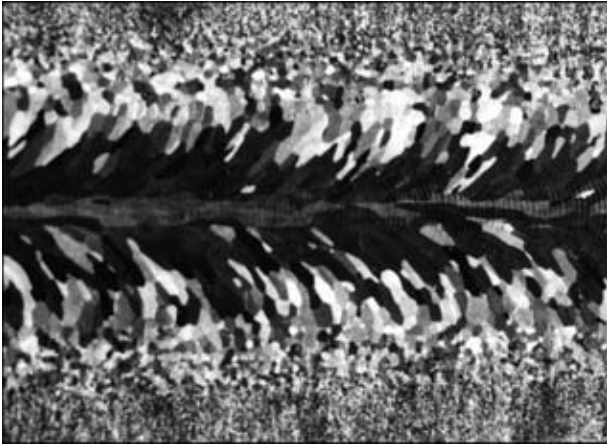
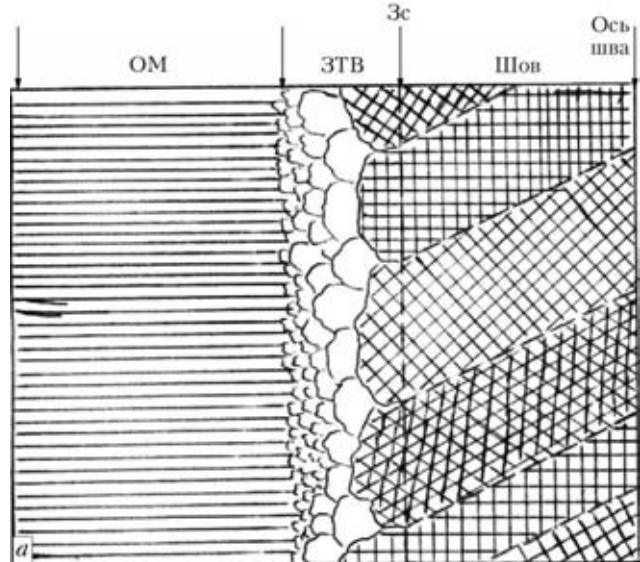


Рис. 2. Макроструктура сварного соединения поликристаллического молибдена, выполненного дуговой сваркой

ществованию случайных рефлексов определяли наличие высокоугловых границ. Объем кристалла, выделенный этими границами из основного монокристалла, оценивали по интегральному значению интенсивности под случайными отражениями. Методом $\theta-2\theta$ изучали форму и ширину дебаевских линий, т. е. распределения интенсивности отражений вдоль дифракционного вектора $I_{q\parallel}$. Методом четырехокружной рентгеновской дифрактометрии [4–6] исследовали интенсивность рассеянного рентгеновского излучения в окрестности узлов обратной решетки в азимутальной плоскости, т. е. в плоскости, перпендикулярной дифракционному вектору $I_{q\perp}$. Этот метод дает возможность анализа $I_{q\perp}$ в любом направлении в азимутальной плоскости и аналогичен методу кривых качения (rocking curves) или ω -сканирования при выделении распределения $I_{q\perp}$ в одном из азимутальных направлений.

Поскольку исходный материал сварного соединения поликристаллического молибдена, полученного при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в инертном газе на скорости 20 м/ч (рис. 2), имел хаотическое распределение кристаллографических ориентировок отдельных зерен, то в металле ЗТВ и шва не было обнаружено заметно выраженной преимущественной ориентации. Однако следует отметить, что рост некоторых зерен металла шва от поверхности оплавленных зерен зоны сплавления был подавлен соседними зернами, кристаллизующимися с более высокой скоростью. Кроме того, замечено, что сварные швы, полученные при высоких скоростях сварки ($v_{св} > 70$ м/ч), в большей степени сохраняют структурное состояние исходного материала.

Структура сварного соединения низколегированного молибденового сплава ЦМ-10 (0,007 % Al и 0,002 % V), выполненного на скорости 70 м/ч, приведена рис. 3. Деформированный прокаткой молибденовый сплав в исходном состоянии содержал следующие компоненты кристаллографической текстуры: $(001)[110]$ и $\{111\}\langle 112\rangle$ и $\langle 110\rangle$. Под воздействием сварочного цикла в металле ЗТВ компонента $(001)[110]$ трансформируется в $(001)[130]$, а компоненты $\{111\}\langle 112\rangle$ и $\langle 110\rangle$ не претерпевают изменений. Кристаллизующиеся



$(001)[110] \rightarrow (001)[130] \rightarrow (001)[130]$
 $\{111\}\langle 110\rangle \rightarrow \{111\}\langle 110\rangle \rightarrow \{111\}\langle 110\rangle$
 $\{111\}\langle 112\rangle \rightarrow \{111\}\langle 112\rangle \rightarrow \{111\}\langle 112\rangle$

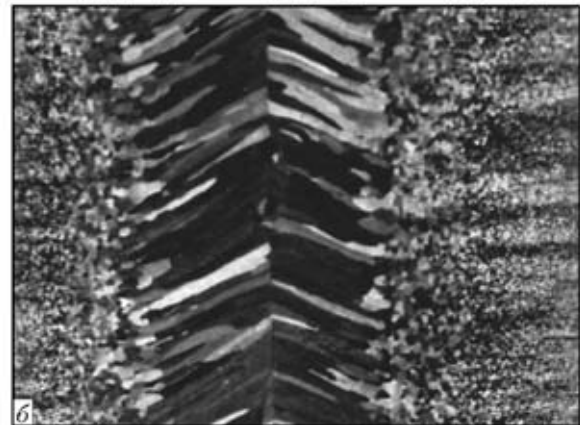


Рис. 3. Схема кристаллизации (а) и макроструктура соединения текстурированного молибденового сплава

зерна металла шва сохраняют ориентировку оплавленных зерен зоны сплавления, с поверхности которых начался их рост.

При сварке текстурированных молибденовых сплавов более высокого уровня легирования (МИ-5 с 4,5 % Re и ЦМ-12 с 0,12 % Hf и 0,10 % Zr) закономерности наследования металлом шва кристаллографических ориентировок исходного материала сохраняются. Характер кристаллографической переориентации зерен в различных участках зоны металла ЗТВ в процессе сварки представлен в таблице. Как следует из этих данных, основная компонента текстуры $(111)[112]$ и $[110]$ легированных молибденовых сплавов в металле ЗТВ не претерпевает существенных изменений. В то же время довольно слабая компонента текстуры деформации $(001)[110]$ в процессе нагрева до температур, превышающих температуру рекристаллизации сплава, вырождается. Таким образом, в сплавах МИ-5 и ЦМ-12 в зону сплавления выходят зерна с кристаллографической ориентацией $(111)[112]$ и $[110]$. Последующая кристаллизация металла шва с поверхности оплавленных зерен зоны сплавления сопровождается наследованием кристаллами металла шва исходных ориентировок.



Характер изменения компонент текстуры металла ЗТВ, нагретого до различных температур, К

Сплав	Компонента текстуры	1300	1500	1700	1900	2100	2300
МИ-5	(001)[110]	(001)[110]	(001)[110]	—	—	—	—
	(111)[112]	(111)[112]	(111)[110]	(111)[112]	(111)[112] (111)[110]	(111)[112]	(111)[112]
ЦМ-12	(001)[110]	(001)[110]	(001)[110]	(001)[110]	(001)[110]	—	—
	(111)[112]	(112)[110]	(112)[110]	(112)[110]	(111)[110]	(111)[112]	(111)[112] (111)[110]

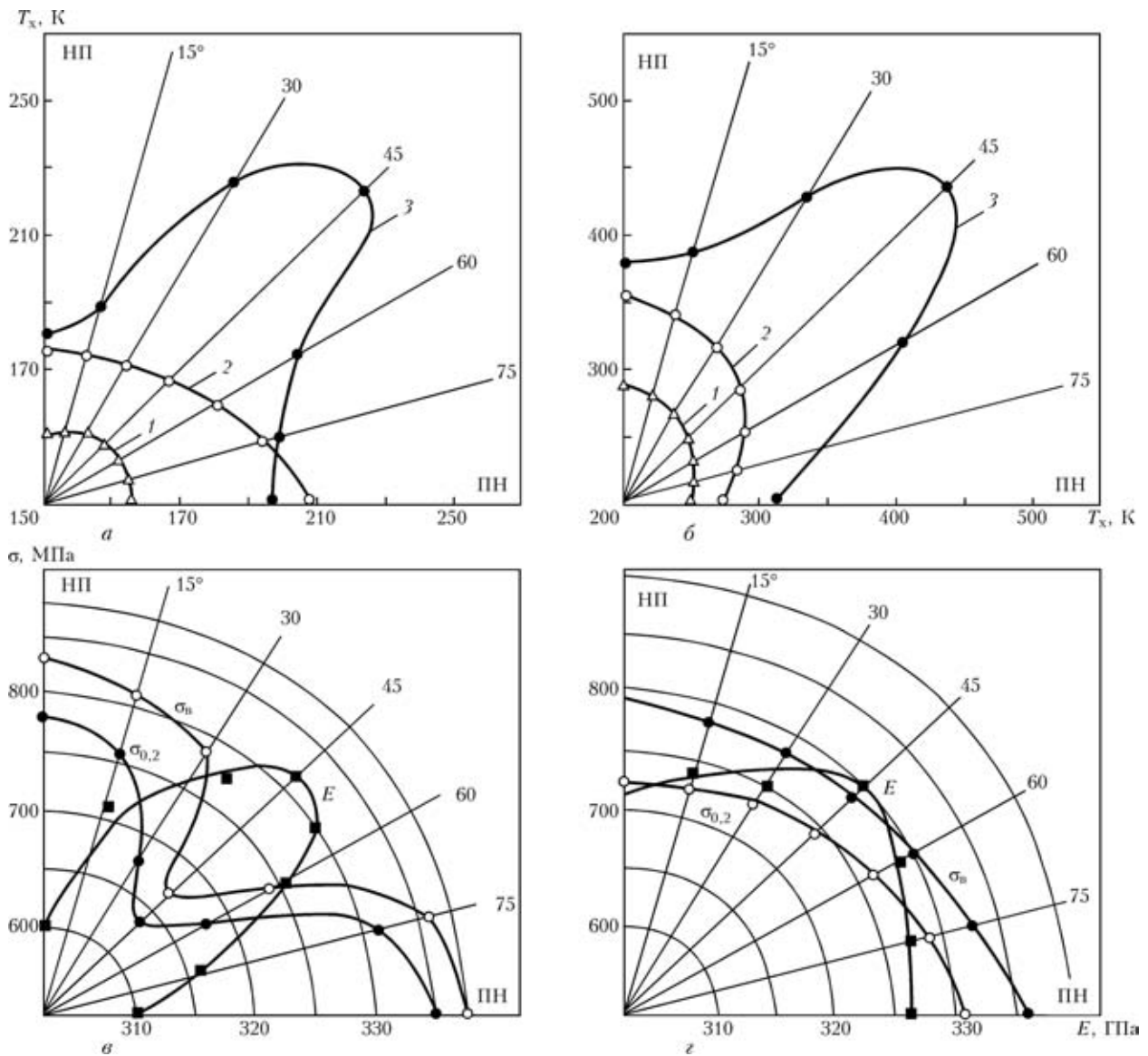


Рис. 4. Зависимость температуры хладноломкости (а, б) и характеристик прочности (в, г) основного металла (а, в, г) и сварного соединения (б) от угла вырезки образцов и направления сварки: а, б: 1 – сплав МИ-5; 2 – ЦМ-10; 3 – ЦМ-12; в, г – соответственно сплав ЦМ-10 и ЦМ-12; НП – направление прокатки (ПН – поперечное направление)

Направление формирования кристаллитов металла шва в соответствии с формой изотерм охлаждения повернуто на 20...30° от нормали к оси сварного шва. Фронту изотерм перпендикулярны направления [112] или [110], а ближайшее направление легкого роста <100> составляет сравнительно большой угол (соответственно 35 или 45°) с направлением роста кристаллитов и не лежит в плоскости листа. В этих условиях кристаллиты металла шва

наследуют кристаллографическую текстуру оплавленных зерен зоны сплавления, т. е. растут вдоль направления [112] или [110] [7, 8].

Наследование в процессе сварки кристаллической текстуры основного металла металлом шва обуславливает взаимосвязь физико-механических характеристик исходного материала и выполненного на нем сварного соединения. Из представленной зависимости на рис. 4 следует, что в случае,

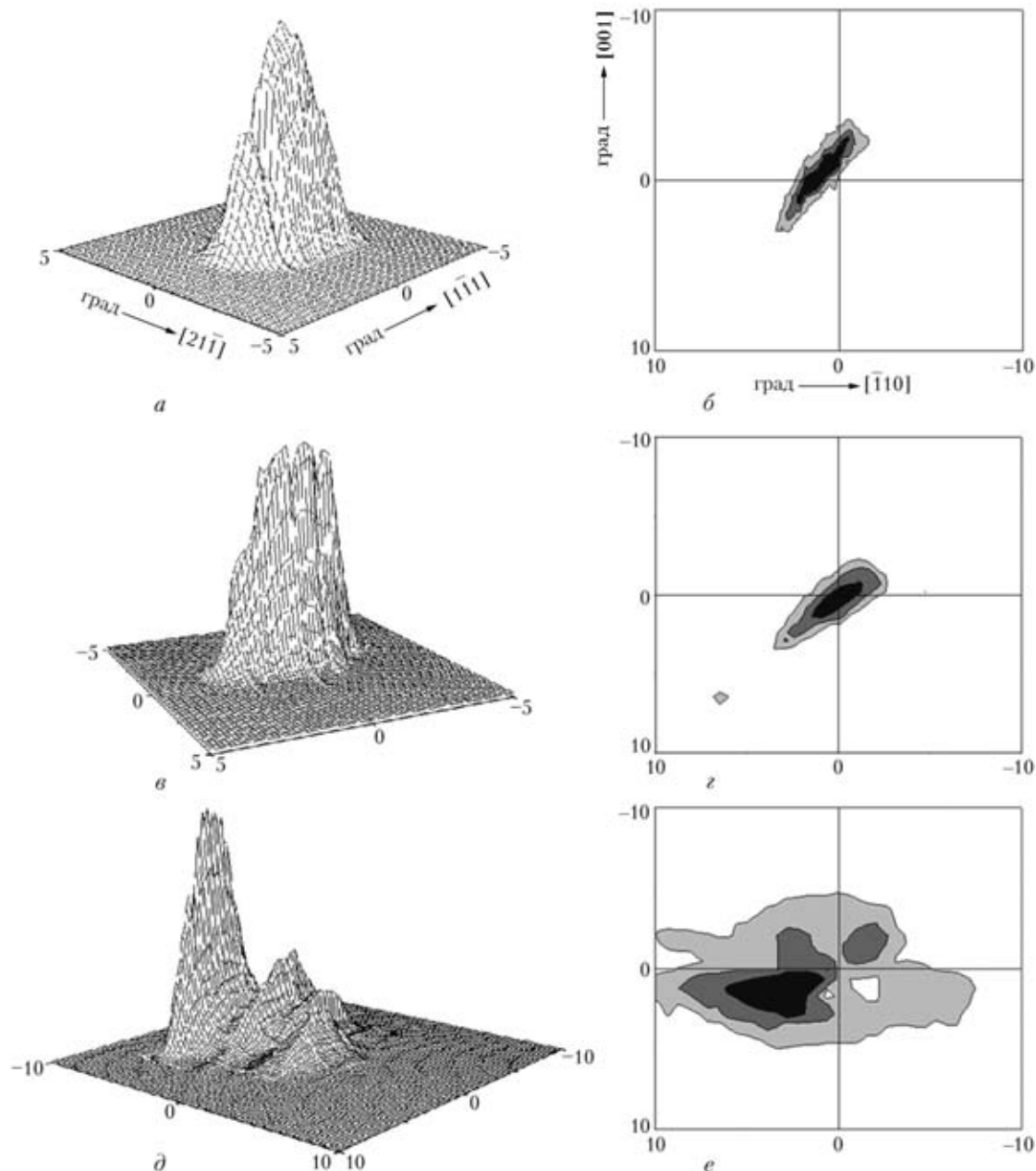


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности I (a, v, d) и изоинтенсивные линии (b, z, e) рассеянного рентгеновского излучения в азимутальной плоскости $I_{q\perp}$ для различных зон сварного соединения монокристаллов вольфрама: a, b — основной металл; v, z — зона сплавления; d, e — центральная часть сварного шва (поверхность оплавления (111) , направление сварки $[110]$, рефлекс (222) , $v_{св} = 100 \text{ м/ч}$)

когда низкотемпературная пластичность текстурированных молибденовых сплавов обусловлена в основном типом кристаллографической текстуры, а металл сварного соединения наследует кристаллографическую ориентировку исходного материала, то направлению, которому соответствует минимальная температура хладноломкости основного металла, будет соответствовать аналогичное направление в сварном соединении. Поэтому минимальная температура хладноломкости для сварных соединений, выполненных на текстурированных молибденовых сплавах, соответствует случаю, когда направление сварки составляет с направлением прокатки исходного материала угол 90° .

Исходный монокристалл вольфрама толщиной 1 мм , с поверхностью которого совпадала плоскость (111) , сваривали ЭЛС таким образом, что направление сварки совпадало с направлением $[110]$. Исходный монокристалл характеризуется однородным распределением малоугловых границ и разориентацией элементов субструктуры в облучаемой поверхности порядка 1 мм^2 менее $10 \dots 20 \text{ мрад}$ (рис. 5, a, v). Исследования сварных соединений, выполненных на монокристаллах вольфрама и молибдена, выявили следующие структурные особенности металла шва. При определенных условиях сварки на монокристаллах вольфрама и молибдена возможно получение монокристаллического состо-

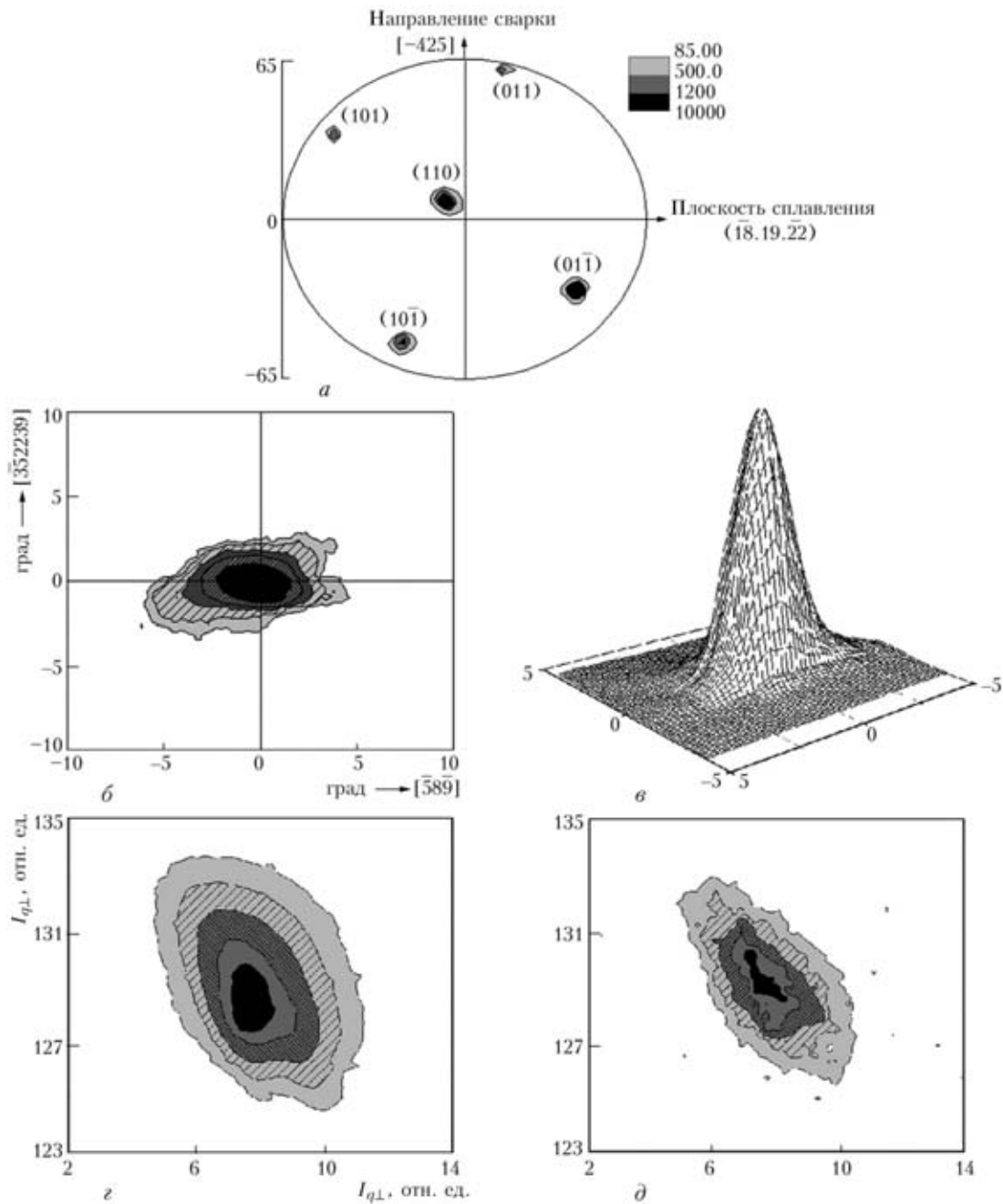


Рис. 6. Полюсная фигура {220} (а), пространственное распределение интенсивности I (в) и изоинтенсивные линии I_{\perp} (б, з, д) рассеянного рентгеновского излучения в исходном никелевом сплаве; б, в – рефлекс (331); з – (220); д

яния сварного соединения. При скоростях сварки 10...100 м/ч вне зависимости от способа (ЭЛС или гелиево-дуговая), а также ориентации поверхности сплавления и направления сварки в процессе кристаллизации сварочной ванны, однозначно прослеживается механизм наследования металлом шва кристаллографической ориентации исходного металла (рис. 5). На рентгенограммах отдельных зон сварного соединения обнаружены отклонения ориентации от исходного направления на угол 35...175 мрад. Так как угол разориентации прежде всего обусловлен точностью стыковки свариваемых кромок, которая составляла 50 мрад, а также учитывая инструментальную погрешность, установить четкую численную зависимость изменения кристаллографической ориентации металла

шва от условий сварки не представляется возможным. В то же время можно выделить основные тенденции наследования металлом сварного соединения кристаллографической ориентации в зависимости от режимов и параметров сварки. При сварке монокристаллов с плоскостью (111) и направлении сварки вдоль направления <112> хорошее наследование монокристалличности наблюдается для небольших скоростей ($v_{св} = 10$ м/ч). В этом случае при разориентировке элементов субструктуры основного металла на уровне 20...30 мрад отклонение в ориентации отдельных участков ЗТВ и металла шва в центральной его части составляло угол 30...50 мрад. Снижение скорости сварки до 3 м/ч повышает совершенство монокристаллической структуры сварного соединения и уменьшает

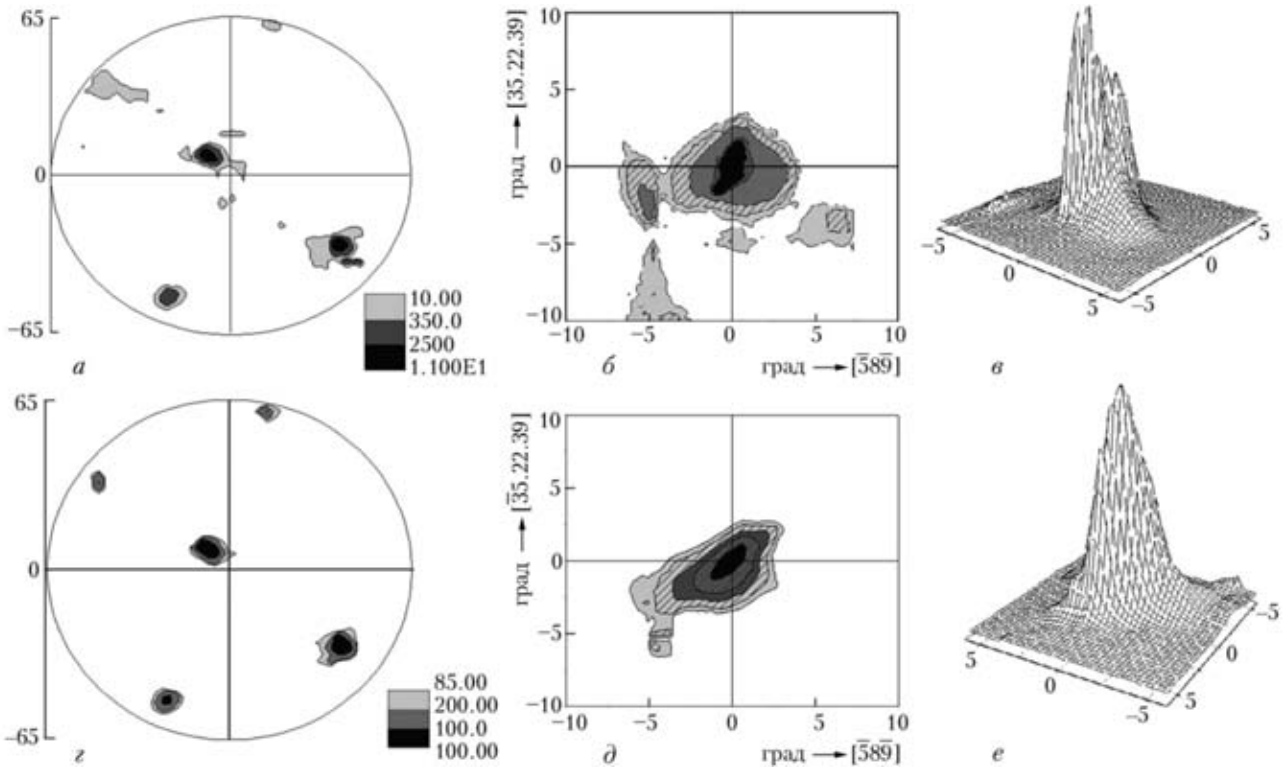


Рис. 7. Полюсные фигуры {220} (а, з), пространственное распределение интенсивности I (в, е) отражения (331) и изоинтенсивные линии $I_{q\perp}$ (б, д) рассеянного рентгеновского излучения в азимутальной плоскости металла шва никелевого сплава; а, б, в — длина шва выполненного на скорости 40 м/ч; з, д, е — то же, но при 20 м/ч

плотность дефектов кристаллической решетки. Разориентация элементов субструктуры в центре сварного шва, полученного на монокристалле (001) [110] на скорости 10 м/ч, достигает 110...140 мрад. В отличие от предыдущего случая при сварке монокристалла данной ориентировки увеличение скорости сварки сопровождается ростом совершенства монокристалличности сварного соединения.

Анализ полученных результатов при ЭЛС монокристаллов вольфрама показывает, что оптимальные результаты получены на монокристаллах со свариваемой поверхностью (111) на малых скоростях сварки. Для ориентации поверхности сплавления {112} не удалось получить швы со структурой, близкой к структуре свариваемого монокристалла. Таким образом, можно сделать вывод, что в случае сварки монокристаллов вольфрама для каждой исходной кристаллографической ориентации существуют свои оптимальные режимы и условия сварки, позволяющие получить наиболее совершенную наследственную структуру сварного соединения.

Электронно-лучевую сварку монокристаллических образцов жаропрочного никелевого сплава осуществляли таким образом, чтобы ее направление не совпадало с осями высокой симметрии. На полюсных фигурах {220}, приведенных на рис. 6, 7, наблюдаются только отражения, соответствующие монокристаллической структуре исходного кристалла. При ЭЛС монокристаллов никелевых сплавов в сварном соединении, как правило, сохраняется монокристаллическая структура исходного сплава (рис. 7, а, з). Однако при определенных условиях сварки в металле шва может

образовываться значительное количество зерен (рис. 8), имеющих отличную от исходного материала кристаллографическую ориентацию. Интенсивное формирование последних вызывает, как правило, увеличение скорости сварки. Нарушение монокристалличности может быть связано с двумя процессами — потерей устойчивости на фронте кристаллизации и фрагментацией материала, если в нем создается неоднородная дислокационная структура. Распределение $I_{q\parallel}$ и $I_{q\perp}$ для швов, полученных на различных скоростях сварки, при которых наблюдается совпадение параметров решетки γ и γ' -фаз и положение максимумов $I_{q\parallel}$ линий позволяют считать, что в большей части объема шва формируется структура с когерентно связанными фазовыми составляющими, а следовательно, на фронте кристаллизации обеспечиваются благоприятные условия для образования монокристаллической структуры. Уменьшение значения $\delta_{q\parallel}$ (полуширины распределения интенсивности $I_{q\parallel}$) при возрастании $\delta_{q\perp}$ (полуширины распределения интенсивности $I_{q\perp}$) в сварных швах, выполненных на высоких скоростях, связано с увеличением локальных напряжений в узкой области сварного соединения, что приводит к фрагментации кристаллитов металла шва (рис. 7, 8).

Известно, что значение и направление термических и деформационных градиентов в сварных соединениях определяются режимами сварки. Возникающие при этом сварочные напряжения при асимметричной ориентации сварочной ванны создают сдвиговые напряжения в плоскостях скольжения. Кристаллографическая асимметрия свароч-



ной ванны, определяя направление максимального термического градиента, приводит (в соответствии с фактором Шмида [9]) к различным касательным напряжениям по разные стороны от оси шва. Уровень этих напряжений, действующих в возможных системах скольжения, несмотря на то, что скорости охлаждения металла шва и форма фронта кристаллизации остаются постоянными, может существенно отличаться. Сдвиговые напряжения в плоскостях скольжения наиболее сильно разнятся в том случае, когда направление максимального температурного градиента изменяется от $\langle 111 \rangle$ к $\langle 100 \rangle$ или к $\langle 110 \rangle$ (в случае, когда направлению сварки соответствует направление от $\langle 112 \rangle$ до $\langle 011 \rangle$) и менее всего — в случае его изменения между $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ (направление сварки вдоль $\langle 001 \rangle$). Полученные экспериментально распределения интенсивности $\delta_{q\perp}$ демонстрируют различную однородность дислокационного ансамбля в металле шва в зависимости от условия сварки. Плавные формы и изоинтенсивные кривые распределений $\delta_{q\perp}$, полученные при режимах на малой скорости, согласно теории [3] отражают статистическую однородность дислокационного ансамбля, т. е. наблюдается достаточное усреднение в зоне рентгеновского облучения по всем параметрам распределения дислокаций. В случае, когда это условие не выполняется, исследуемая структура представляет собой неоднородный дислокационный ансамбль со сравнительно крупной мозаичной структурой. Распределение $\delta_{q\perp}$ представляет собой многопиковые или асимметричные кривые, что наблюдается при высоких скоростях сварки. Форма распределения $\delta_{q\perp}$ в неоднородных дислокационных ансамблях существенно зависит от соотношения размеров и углов разориентации крупных и более мелких фрагментов и блоков, образующих эту структуру. Это позволяет по распределению $\delta_{q\perp}$ оценивать однородность дислокационного ансамбля на различных структурных уровнях, т. е. вид распределения $\delta_{q\perp}$ служит качественным показателем множественности систем дислокаций и их однородности распределения в материале. В неоднородно разориентированных дислокационных структурах (высокие скорости сварки) образуются локальные участки высокой скалярной плотности дислокаций. Это ведет к ускорению деформации под влиянием временных и остаточных сварочных напряжений и, как следствие, к фрагментации материала. Однородность дислокационной структуры и плотность дислокаций определяются температурно-напряженными условиями в металле шва. Их уровень обусловлен режимами сварки, при которых создаются условия относительно высокотемпературного формирования структуры при малой скорости сварки и низкотемпературный механизм ее образования при высоких скоростях сварки. Плотность дислокаций в металле шва, полученного на низких скоростях сварки ($\Delta\delta_{q\perp} \cong 0,3 \dots 0,5^\circ$) соответствует увеличению плотности дислокаций в 6...8 раз по сравнению с исходным значением, а при сварке на

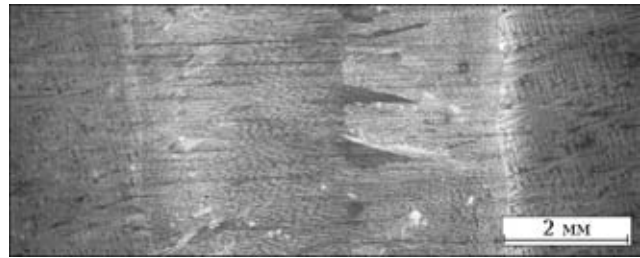


Рис. 8. Микроструктура сварного соединения монокристаллического никелевого сплава Ni-Cr-Al-W-Co (суммарное содержание алюминия, титана и ниобия

высоких скоростях плотность дислокаций возрастает в 15...20 раз.

Таким образом, напряжения в сварном шве при асимметричном расположении сварочной ванны создают разные значения плотности дислокаций в первичных и вторичных системах скольжения и определяют их распределение в металле сварного соединения. Увеличение плотности дислокаций вследствие протекания процессов полигонизации и особенности формирования субструктуры вызывают развитие неоднородных разориентировок субструктурных элементов и образование различных структурных уровней. Локально измеренная скалярная плотность дислокаций в различных участках неоднородной многоуровневой субструктуры значительно возрастает по сравнению со средней плотностью дислокаций, что ведет к фрагментации и возможному образованию дефектов в виде микронадрывов или зародышевых трещин.

Выводы

1. При сварке плавлением структурно-ориентированных металлических материалов возможно наследование кристаллизующимся металлом шва структурной и кристаллографической ориентации исходного материала. Это обусловлено контролируемым эпитаксиальным ростом кристаллитов металла шва от оплавленной поверхности зерен зоны сплавления.
2. Для ОЦК (молибден, вольфрам) и ГЦК (никелевые сплавы) монокристаллов сохранение монокристаллической сварного соединения наблюдается, когда направление сварки совпадает с направлениями высокой симметрии свариваемого монокристалла.
3. При асимметричной ориентации сварочной ванны по разные стороны от оси сварного соединения возникают отличающиеся по значению касательные напряжения. Различие в сдвиговых напряжениях может приводить к нарушению совершенства монокристаллической структуры сварного соединения.

1. Пальме Р. Влияние текстур деформации на свойства тугоплавких металлов // Новые тугоплавкие металлические материалы. — М.: Мир, 1971. — С. 39–43.
2. Gaumann M., Bezencon C., Kurz W. Columnar to equiaxed transition in solidification processing // Sci. and Techn. of Advan. Materials. — 2001. — № 2. — P. 185–191.
3. Krivoglaз M. A. X-ray and neutron diffraction in nonideal crystals. — Berlin: Springer Verl., 1996. — 407 S.
4. Karasevskaya O. P. Orientation X-ray experimental method for phase analysis of polycrystals // Met. Phys. and Techn. — 1999. — 21, № 8. — P. 34–39.



5. *Fewster P. F.* Commission on powder diffract // Intern. union of crystallography, microstructure of materials, Newsletter, 24, Dec., 2000. — P. 17.
6. *Карасевская О. П.* Многоуровневые структуры // Металлофизика и новейшие технологии. — 2000. — 22, № 11. — С. 44–53.
7. *Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена* / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Р. К. Иващенко и др. / Под общ. ред. В. И. Трефилова. — Киев: Наук. думка, 1983. — 232 с.
8. *Формирование* кристаллографической текстуры в металле сварных соединений молибденовых сплавов / Б. А. Задерий, С. С. Котенко, А. Е. Маринченко и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 11. — С. 13–17.
9. *Шмид Е., Боас В.* Пластичность кристаллов, в особенности металлических. — М.: ГОНТИ ККП СССР, 1938. — 316 с.

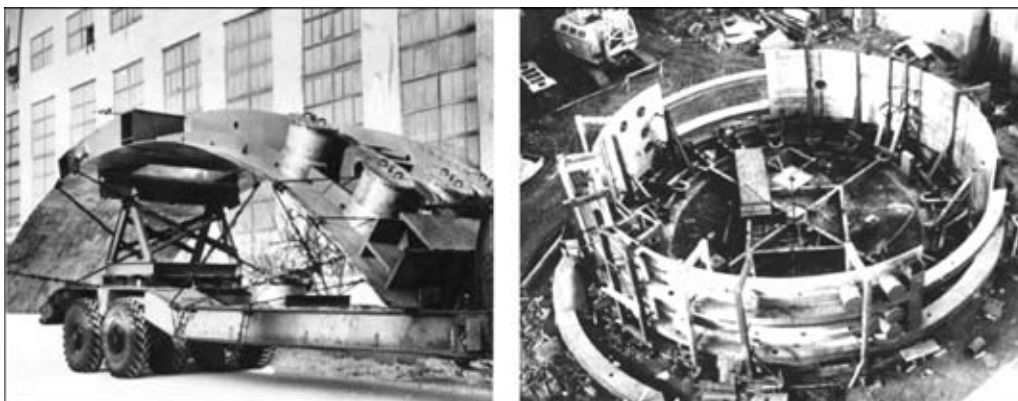
The paper deals with the features of fusion welding of textured and produced by directional solidification poly- and single-crystal alloys of molybdenum, tungsten and nickel. X-ray investigation methods were used to obtain data on inheriting the structural and crystallographic orientation in different zones of the welded joint. It is established that at weld pool solidification the epitaxial growth of weld metal crystallites from the substrate (surface of partially melted grains of the fusion zone) may result in the weld metal reproducing the crystallographic orientation of the structural elements of the initial material. Basic possibility of preservation in the welded joint of crystallographic orientation and structural condition close to that of the base metal is confirmed.

Поступила в редакцию 13.04.2005

СВАРКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИМИТАТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Разработана технология сварки для изготовления камеры вертикальных испытаний, представляющей собой цилиндрический сосуд диаметром 16000 мм, длиной примерно 50000 мм и объемом примерно 10000 м³. Камера предназначена для имитации космических условий и испытаний в этих условиях различных изделий в вертикальном положении. Имитатор космоса состоит из цилиндрической части, изготавливаемой из стали 03X13AG19 (ЧС-46), толщиной 20 мм, двух доннышек из стали 12X18H10T толщиной 24 мм и силового набора из стали 09Г2С толщиной до 30 мм.

Заготовки цилиндрической части камеры (обечайки 1/4 диаметра) изготавливали в заводских условиях вместе с силовым набором и поставляли на монтажную площадку. На монтаже вертикальные швы обечаек длиной 4000 мм выполняли ЭШС проволокой Св-05X15H9AG6 (ЧС-31) под флюсом АН-45. Для сварки горизонтальных швов на вертикальной плоскости при наращивании обечаек использовали электроды АНВ-24.



Заготовки доннышек из стали 12X18H10T сваривали в заводских условиях. Экраны, по которым пропускается жидкий гелий для имитации температур космоса, изготавливали из сплава инвар и сваривали аргонодуговым способом. Качество швов контролировали рентгеном, вакуумную плоскость — гелиевым течеискателем.

Назначение и область применения. Камера вертикальных испытаний предназначена для имитации космических условий (температура, вакуум, освещенность) и испытания ракет. Разработанная технология применена при изготовлении камеры вертикальных исследований в России.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 19
 Тел./факс: (38044) 289 90 87, 287 10 88



СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ СВОЙСТВ СВАРОЧНЫХ ПОРШКОВЫХ ПРОВОЛОК*

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показана актуальность совершенствования методов прогнозирования и оценки свойств сварочных материалов для дальнейшего прогресса в использовании механизированных и автоматизированных процессов сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочные материалы, порошковые проволоки, эффективность использования, методы исследования, прогнозирование и оценка свойств

Повышение эффективности, качественных и экологических показателей сварочных технологий вызывает необходимость ужесточения требований к сварочным материалам. Использование известных положений металлургии и технологии дуговой сварки плавлением может служить основной, но недостаточной базой для комплексного решения задач сварочного производства.

За последние два десятилетия развитие сварки порошковой проволокой привело к созданию новых типов этого электродного материала и специализированных технологий с их использованием [1–3], что способствовало расширению областей и объемов применения способа и повышению его конкурентоспособности по сравнению с другими технологиями. Решение задач совершенствования способа потребовало создания и использования современных подходов к прогнозированию свойств, аналитических методов и экспериментальных процедур, обеспечивающих получение количественных данных и зависимостей, корригирующих с достигаемыми результатами.

Процессы, сопровождающие плавление порошковой проволоки. При сварке порошковой проволокой ток преимущественно протекает по оболочке, поэтому его плотность и производительность плавления выше, чем при использовании проволок сплошного сечения равного диаметра. Учитывая высокую скорость плавления, нагрев и плавление сердечника происходят преимущественно в результате теплопередачи с торца оплавленной проволоки и в меньшей степени от оболочки. При этом доля тепла, поступающего в сердечник от оболочки, возрастает с увеличением величины вылета [4]. Специфические условия плавления порошкового сердечника определяют влияние его состава на характеристики плавления проволоки, перенос электродного металла, состав и свойства газовой и шлаковой фаз, взаимодействующих с расплав-

ленным металлом. Для прогнозирования указанных процессов в ИЭС им. Е. О. Патона успешно используется комплексный термический анализ компонентов и порошковых смесей — моделей сердечника проволок.

Исследована кинетика процессов термодеструкции карбонатов, фторидов, органических материалов, процессов образования расплавов, окисления металлических порошков, испарения влаги, что позволило создать банк данных физико-химических свойств материалов сердечника при непрерывном нагреве. Существенным шагом в развитии представлений о реально протекающем процессе явилась разработка и реализации методики прогнозирования развития реакций при реальных скоростях нагрева и плавления проволоки, достигающих $10^4 \dots 10^6$ К/мин. Программа расчета базируется на использовании данных динамического термогравиметрического анализа с различной скоростью нагрева, позволяющих получить сведения об энергии активации реакций, механизме и последовательности протекающих процессов. Расчеты с использованием ЭВМ позволили построить кинетические диаграммы степени развития реакций диссоциации карбонатов и фторидов, играющих существенную роль в металлургических процессах [5].

В результате комплексного термоанализа порошковых смесей (моделей сердечника проволок) установлены закономерности развития реакций между компонентами и влияние состава смеси на кинетику процессов, протекающих при нагреве и плавлении. Изучение процессов окисления порошка железа и ферросплавов показало, что скорости окисления невелики и влияние газовой выделения при диссоциации карбонатов на этот процесс незначительно. На кинетику газовой выделения существенно влияет состав смеси, что дает возможность регулировать процессы образования углекислого газа и летучих фторидов при плавлении проволоки [6].

Исследование кинетики испарения влаги из материалов сердечника показало, что нагрев на вылете проволоки позволяет удалить лишь некоторую часть паров воды. Поэтому необходимы дополнительные металлургические и технологические меры для снижения содержания водорода в металле. Волоочильная смазка, находящаяся на поверхности проволоки, служит не только источником поступления водорода в атмосферу дуги, но

* По материалам доклада, заслушанного на III Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ (г. Днепропетровск, 1–4 июня 2004 г.).



и одним из источников выделения сварочного аэрозоля. Термодеструкция волоочильной смазки протекает в несколько стадий со скоростью, которая не обеспечивает ее полное выгорание при нагреве на вылете.

Результаты исследований свойств материалов сердечника и порошковых смесей позволяют прогнозировать состав газовой и шлаковой фаз, вступающих во взаимодействие с расплавленным металлом, и характеристики плавления проволоки.

Реакции расплавленного металла с газами.

При дуговой сварке плавлением на процессы поглощения металлом газов (кислорода, азота, водорода) влияет большое количество факторов, что существенно осложняет анализ их влияния на газонасыщенность металла сварного шва. Особенности плавления порошковой проволоки, обусловленные расположением порошковых материалов внутри металлической оболочки и развитием реакций при нагреве и плавлении порошкового композита, требуют неременного учета особых условий взаимодействия металла с газами. В условиях установившегося сварочного процесса допустимо принимать термодинамические параметры (распределение температур, концентраций и давления), близкие к состоянию динамического равновесия в пределах зоны плавления. При этих условиях поглощение газа может быть описано гладкой кинетической функцией градиентной системы [7]. Определение функции по интегральному значению через градиент концентраций возможно при принятии схемы контакта фаз. Для условий сварки порошковой проволокой с учетом существования стадий капли электродного металла и металла сварочной ванны целесообразно процесс взаимодействия металла с газами рассматривать как двухстадийный с общей газовой фазой. На стадии ванны протекает типичное для способов сварки плавлением разбавление электродного металла оплаиваемой частью основного. В то же время на стадии капли, кроме непрерывного обновления металла капли оплаивающейся оболочкой, протекает разбавление металллическими порошками. Шлаковая фаза на стадии капли в значительной степени гетерогенная в результате непрерывного оплавления твердых частиц неметаллических составляющих сердечника и протекания реакций взаимодействия и термодеструкции веществ. При моделировании поглощения газов в металле расчеты удобно проводить с использованием масс в мольных долях, что позволяет избежать ошибок при пересчетах на объемные или массовые проценты и обеспечивает сквозной анализ двухстадийного процесса.

В качестве базовых положений, сформулированных в ходе расчетов, можно выделить следующие. С позиций снижения поглощения газов в металле следует обеспечивать постоянство соотношения масс металла в мольных долях и газа при изменении скорости плавления проволоки и свойств шлаковой фазы, образующейся при плавлении сердечника. Поглощение металлом газов из атмосферы дуги при мелкокапельном переносе более активное. На стадии ванны закономерности

поглощения металлом газов совпадают с установленными для сварки покрытыми электродами и проволоками сплошного сечения в защитных газах. Поглощение газов металлом на стадии капли при сварке порошковой проволокой находится в существенной зависимости от свойств сердечника и условий плавления, включая параметры сварки. Это в наибольшей степени проявляется при сварке самозащитной порошковой проволокой, при создании композиций, из которых особое внимание уделяется, например, принятию мер металлургического характера для снижения содержания газов (использование нитридообразующих элементов в сочетании с активными раскислителями, комплексных фторидов, комбинаций карбонатов и т. п.).

Свойства порошковых проволок. Учитываются обычно три основные группы свойств сварочных порошковых проволок: сварочно-технологические (оперативные), санитарно-гигиенические, а также состав и свойства металла шва (сварного соединения). Соответствующие требования сформулированы в национальных и международных стандартах, в частности ГОСТ 26271–91, AWS/SFA A5.20 и A5.29, евро стандарте EN 758 и др. В стандарты включаются только те технические требования, которые могут быть проверены изготовителем, потребителем и независимой специализированной экспертизой с достаточной степенью объективности.

Из группы сварочно-технологических свойств в стандарты включены преимущественно требования технологического качества (отсутствие пор, трещин, шлаковых включений), которые могут быть проверены методами неразрушающего контроля, осмотром и разрушением технологических проб. В ряде стандартов присутствуют факультативные требования по оперативным свойствам, так как отсутствуют общепринятые методики.

Необходимость достижения высоких сварочно-технологических свойств существенно возрастает в связи с обострением конкуренции на рынке сварочных материалов. В то же время можно выделить работы по исследованию стабильности горения дуги и методам оценки на основе статистического анализа [8], а также по оценке влияния металлургических факторов, в частности поверхностного натяжения и вязкости шлаков, на сварочно-технологические свойства при сварке порошковой проволокой в различных пространственных положениях [9].

Особое внимание сегодня следует уделять проблеме обеспечения наиболее безопасных санитарно-гигиенических условий сварки. Требования по этой группе свойств определены в соответствующем разделе ГОСТ 26271–91 и Санитарных нормах по сварке. Методики оценки санитарно-гигиенических свойств в основном имеют специализированные организации. Имеющиеся публикации освещают вопросы влияния различных факторов преимущественно на выделение твердой фазы сварочного аэрозоля, а также на использование современных средств вентиляции и индивидуальной защиты при дуговой сварке. Нерешенность ряда проблем улучшения санитарно-гигиенических



свойств при электродуговой сварке плавлением может стать одним из наиболее сдерживающих факторов применения технологии.

Требования к составу и свойствам металла шва и сварного соединения наиболее полно сформулированы в стандартах на сварочные порошковые проволоки. Методики определения свойств стандартизированы, за исключением анализа содержания диффузионного водорода в металле шва. Приоритетное положение занимает методика хромографического анализа. Недостатка в публикациях по проблеме водорода нет. Актуальность проблемы снижения содержания водорода в металле диктуется постоянным увеличением объема применения высокопрочных сталей [10], при сварке которых достижение низких и ультранизких содержаний диффузионного водорода в металле швов существенно снижает вероятность появления холодных трещин.

В современных стандартах на стали указаны требования к механическим свойствам металла шва и сварного соединения (классификация по пределу текучести, определение ударной вязкости на образцах с острым надрезом и т. п.). Несмотря на достаточно большое количество публикаций по вопросам исследования различных аспектов обеспечения выполнения требований к свойствам, системный подход к решению проблем освещен мало. Среди наиболее значимых можно выделить публикации по прогнозированию с использованием нейронных сетей показателей прочности и вязкости сварных соединений сталей [11], а также методам прогнозирования свойств металла шва, учитывающим состав металла, скорость охлаждения, особенности кристаллизации и образования неметаллических включений [12].

Создание, развитие и широкое применение современных методов прогнозирования и оценки

The paper shows the urgency of improvement of the methods of prediction and evaluation of welding consumable properties to achieve further progress in their application in the mechanized and automated welding processes.

свойств сварочных материалов и, в частности, порошковых проволок, позволит ускорить прогресс в развитии механизированных и автоматизированных процессов сварки, повышении качества и долговечности сварных конструкций.

1. *Походня И. К.* Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Автомат. сварка. — 2003. — № 3. — С. 9–19.
2. *Heuwood J.* Cored wire review // Svetsaren. — 1996. — № 1/2. — Р. 3–5.
3. *Myers D.* Metal cored wires: advantages, disadvantages // Welding J. — 2002. — № 9. — Р. 39–42.
4. *Походня И. К., Сунтель А. М., Шлепаков В. Н.* Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 210 с.
5. *Шлепаков В. Н., Сунтури С. А., Котельчук А. С.* Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой // Информационные материалы СЭВ. — Киев: Наук. думка, 1986. — Вып. 1. — С. 19–28.
6. *Pokhodnya I. K., Shlepakov V. N.* Welding with flux-cored wire / Ed. B. E. Paton. — Singapore: Harwood Acad. publ., 1995. — Vol. 4. — Pt 4. — 75 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
7. *Шлепаков В. Н.* Кинетика процессов взаимодействия металла с газами при сварке порошковой проволокой // Проблемы сварки и специальной электротехнологии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 168–173.
8. *Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Сунтури С. А.* Идентификация состава порошковых проволок по электрическим сигналам дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1999. — № 8. — С. 37–42.
9. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Влияние поверхностного натяжения солеоксидных сварочных шлаков на показатели сварочно-технологических свойств самозащитной порошковой проволоки // Там же. — 2001. — № 11. — С. 24–27.
10. *Патон Б. Е.* Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Там же. — 2003. — № 10/11. — С. 7–13.
11. *Neural network analysis of strength and ductility of welding alloy shipbuilding steels* / E. A. Metzbowler, J. J. De Loach, S. H. Lalam, H. K. D. H. Bhadeshia // Science and Technology of Welding J. — 2001. — 6, № 2. — Р. 116–124.
12. *Прогнозирование свойств металла шва повышенной прочности* / Д. Л. Олсон, Э. Метцбауэр, С. Лиу, И. Д. Парк // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 32–39.

Поступила в редакцию 27.12.2004

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

Разработана порошковая проволока ПП-Нп-30Х20МН и технология электродуговой наплавки штоков гидроцилиндров различных механизмов и машин — крепей шахтных проходческих комбайнов, карьерных автосамосвалов и т.д.

Штоки гидроцилиндров изготавливают из сталей типа 30Х и для защиты от коррозии их рабочую поверхность хромируют. По предложенной технологии наплавка изношенных штоков может производиться после предварительной механической обработки рабочей поверхности или непосредственно по хромовому гальваническому покрытию.

Штоки наплавляются в один слой под флюсом АН-26П. Разработанная порошковая проволока обеспечивает получение наплавленного металла системы легирования Fe-Cr-Ni-Mo, обладающего высокой коррозионной стойкостью в первом наплавленном слое. Шлифовка наплавленной поверхности обеспечивает необходимую чистоту, а высокая коррозионная стойкость наплавленного слоя исключает операцию хромирования. Имеется опыт наплавки штоков диаметром 70 мм и выше.

Назначение и область применения. Наплавка штоков гидроцилиндров.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 2
Тел./факс: (380044) 287 63 57



РАСЧЕТНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМЫХ РАЗМЕРОВ НЕПРОПЛАВЛЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ СЛОЖНОМ СПЕКТРЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК*

Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Применительно к сварным соединениям рам ветроэнергетических установок рассмотрен расчетный алгоритм определения допустимых непроплавлений в соответствующих сварных соединениях при циклическом нагружении рамы сложным спектром нагрузок (усилий и моментов) на базе $2 \cdot 10^8$ циклов. Используются экспериментальные наблюдения относительно спектра размахов шести типов нагрузок по Q_j ($j = 1, \dots, 6$) и численное решение относительно номинальных мембранных и изгибных напряжений в околошовной зоне сварных швов от единичных нагрузок Q_j , по которым синтезируются суперпозицией напряжения в околошовной зоне от всех нагрузок на данном цикле нагружения.

Ключевые слова: дуговая сварка, толстостенные изделия, сварные соединения, корень шва, непроплавления, допустимые размеры, циклические нагрузки, расчетный алгоритм

Вопросы оценки допустимости выявленных дефектов в сварных соединениях, особенно на стадии изготовления (эксплуатации), когда их исправление связано с большими сложностями, весьма актуальны и привлекают большой интерес во всем мире [1–4 и др.]. При сварке толстостенных изделий одним из таких типовых дефектов могут быть непроплавления в корне шва (рис. 1). В ряде случаев такие непроплавления ограниченных размеров $2a < [2a]$ допускаются при эксплуатации, если они не влияют на безопасность работы конструкции. Поскольку определение величины $[2a]$ связано с индивидуальными особенностями конструкции, нагруженностью, условиями эксплуатации и т. п., т. е. требует достаточно тщательной проработки для каждого случая, то большинство решений в ответственных конструкциях для величины $[2a]$ имеет консервативно запретительный характер, т. е. $[2a] \approx 0$, хотя большинство правил для таких конструкций не исключает возможности, что $[2a] > 0$, если при этом доказана безопасность работы соединения. В качестве средств для доказательства, например, в работе [5] рекомендуется применение только методов механики разрушения тел с трещинами. Опыт использования последних показал их широкие возможности для надежного решения подобных задач.

В настоящей работе такой подход применен для получения данных по допускаемым значениям $[2a]$ для сварных соединений, приведенных на рис. 1, которые использованы в раме ветроэнер-

гетических установок (ВЭУ) мощностью около 2550 кВт и разработаны фирмой «Nordex Energy» (рис. 2). Рама изготовлена из стали S235J263 + N + Z25 по DIN EN10025; 1993. Стыковые и угловые сварные швы выполнены дуговой сваркой в углекислом газе. При этом использована сварочная проволока марки ЕМК6 (Böhler). Данные о химическом составе основного металла и сварных швов и их механических свойствах приведены в табл. 1. Толщины соединяемых элементов в различных соединениях рамы изменяются в пределах 12...70 мм.

Нагрузки в сварных швах рамы связаны с работой ВЭУ и определяются величинами трех усилий F_j и трех моментов M_j ($j = x, y, z$) на приводном

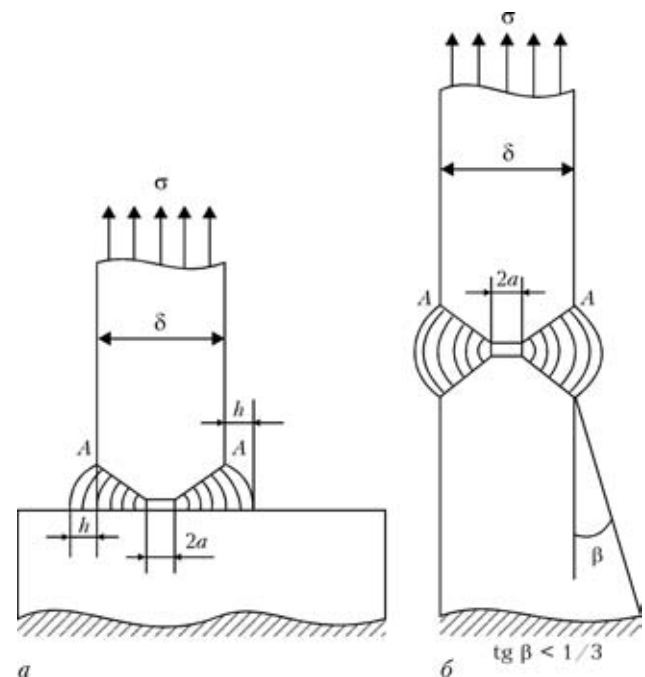


Рис. 1. Схемы сварных соединений с непроплавлением у таврового (а) и стыкового (б) соединения: А–А – зона наименьшего сопротивления образованию усталостной трещины при $a \rightarrow 0$

* По материалам доклада, заслушанного на Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Кацивели, Крым, 13–17 сент. 2004.

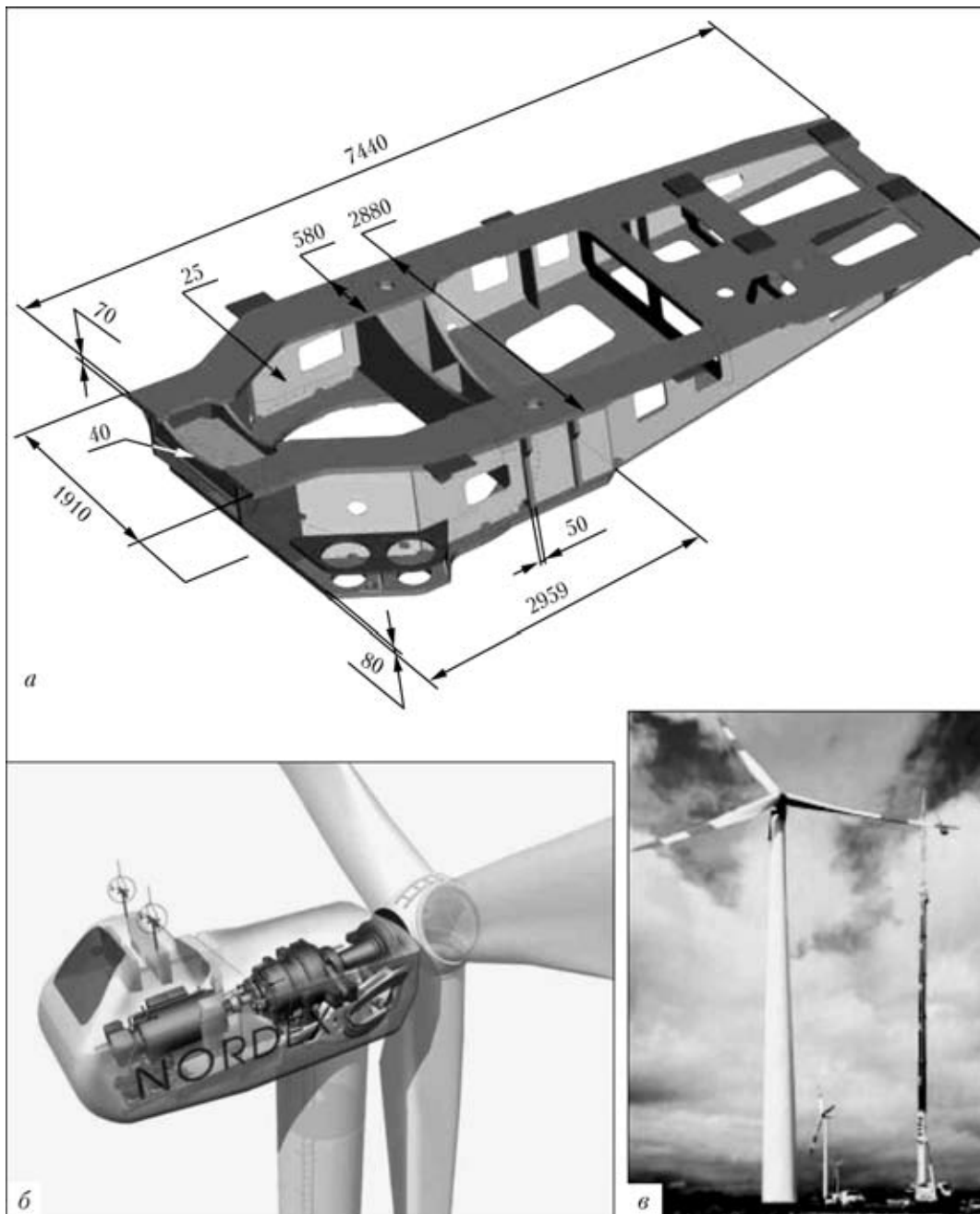


Рис. 2. Ветровая энергетическая установка мощностью 2550 кВт: а – эскиз рамы; б – схема размещения агрегатов на раме ВЭУ; в – общий вид

валу, как показано на рис. 3. В дальнейшем вектор этих нагрузок обозначается Q_j ($j = 1, 2, \dots, 6$). Экстремальное сочетание этих нагрузок приведено в табл. 2, а положительное направление Q_j показано на рис. 3. При вращении вала нагрузки Q_j , как видно из табл. 2, колеблются. За один оборот вала они изменяются несинхронно от Q_j^{\min} до

Q_j^{\max} , при этом отношение $Q_{j\alpha}/Q_j^{\max} = R_{j\alpha}$ остается примерно постоянным, где α – угол поворота вала (табл. 3). Между размахом изменения нагрузки ΔQ_j и Q_j^{\max} следует зависимость из табл. 2

$$\Delta Q_j = Q_j^{\max}(1 - R_{j\alpha}^{\min}). \quad (1)$$

Таблица 1. Химический состав и механические свойства основного металла и металла сварных швов рамы ВЭУ

Металл	Массовое содержание элементов, %						Механические свойства			
	C	Mn	Si	S	P	Al	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	KCV_{-40} , Дж
Основной	0,14...0,17	0,68...1,03	0,23...0,29	0,01...0,023	0,009...0,020	0,027...0,42	285...339	424...470	24...33	–
Сварные швы	0,07...0,10	1,47...1,54	0,85...0,9	0,013...0,015	0,010...0,012	–	> 400	480...600	> 22	> 47



Таблица 2. Экстремальные сочетания нагрузок Q_j

Номер сочетания	Случай нагрузки	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
		F_x , кН	F_y , кН	F_z , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м
1	E1.1d1	441	186,4	102,2	2188,0	-4689	1374,0
2	S1.1a1	307,4	16,0	84,8	-34,4	-179,3	2136,0
3	E1.1d1	413,2	155,4	52,2	3748,0	-2911,0	1272,0
4	E1.11	374,0	134,0	123,0	1480	-3860,0	1180,0

Если методами теории упругости определить компоненты тензора напряжений $\bar{\sigma}_{pq}^{(j)}$ от единичной нагрузки Q_j в соответствующих точках x, y, z сварного соединения, то с помощью метода суперпозиции можно найти суммарные напряжения $\sigma_{pq}^{(\alpha)}$ ($p, q = x, y, z$) в точке x, y, z для различных углов α , т. е.

$$\sigma_{pq}^{(\alpha)} = \sum_{j=1}^6 \bar{\sigma}_{pq}^{(j)}(x, y, z) Q_j^{\max} R_{j\alpha} \quad (2)$$

Таким образом, для каждого сварного шва рассматриваемой рамы можно определить номинальные нормальные напряжения, действующие по нормали к плоскости непроплавления $\sigma_{qq}^{(\alpha)}$ в различных точках вдоль сварного шва как на внутренней, так и на наружной поверхности. По номинальным напряжениям $\sigma_{qq}^{(\alpha)}$ можно вычислить мембранное усилие $P_i^{(\alpha)}$ и момент $M_i^{(\alpha)}$, где i — номер точки вдоль сварного шва.

Величины $P_i^{(\alpha)}$ и $M_i^{(\alpha)}$ являются основными характеристиками внешнего нагружения рассматриваемых сварных швов. Необходимые для их вычисления данные $\bar{\sigma}_{pq}^{(j)}(x, y, z)$ от действия единичных сил Q_j получены численным решением упругих задач. При этом использована конечно-элементная модель, показанная на рис. 4.

В качестве иллюстрации в табл. 4 приведены результаты такого расчета относительно номинальных $\bar{\sigma}_{xx}^{(j) \text{ in}}$ и $\bar{\sigma}_{xx}^{(j) \text{ out}}$ (индекс in означает на внутренней поверхности соответствующего элемента) для сварного шва № 19 ($q = x$) рамы ВЭУ при $j = 1, 2, \dots, 6$. Номер точки i связан с координатой y зависимостью ($i = y - 885 / \Delta y$).

Подобные таблицы $\bar{\sigma}_{qq}^{(j)}$ сформированы для всех 60 сварных соединений рамы ВЭУ и служат основой для расчета $P_i^{(\alpha)}$ и $M_i^{(\alpha)}$ в зависимости от Q_j .

В процессе эксплуатации нагрузки Q_j могут изменяться в широких пределах. Фирмой «Nordex Energy» представлен спектр изменения размахов ΔQ_j при эксплуатации рассматриваемых ВЭУ. На основе этих данных сформирован расчетный спектр размахов ΔQ_{jm} (табл. 5), состоящий из $m = 1, 2, \dots, 23$ строк, характеризующихся одинаковыми ΔN_m для всех j , на базе примерно $N = 2 \cdot 10^8$ циклов. Здесь ΔN_m — количество циклов соответствующего размаха ΔQ_{jm} в общей долговечности конструкции. По ним с использованием зависимостей (1), (2) определяются $P_{im}^{(\alpha)}$ и $M_{im}^{(\alpha)}$, являющиеся

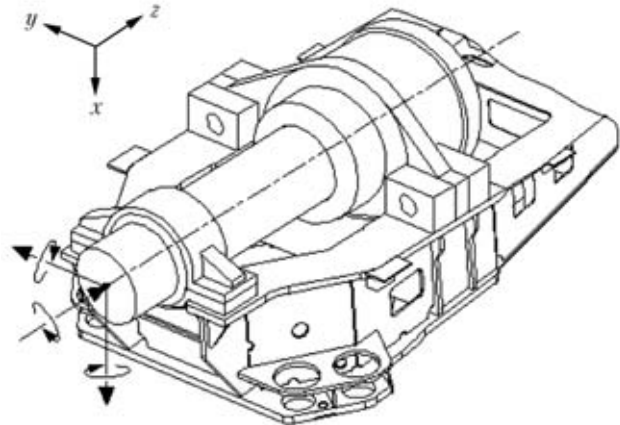


Рис. 3. Схема приложения нагрузок на приводном валу

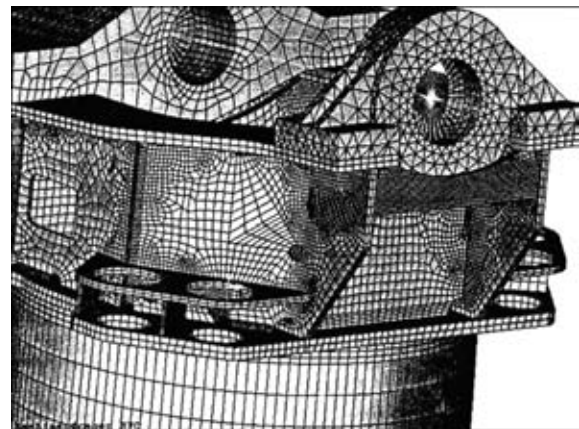


Рис. 4. Модель рамы ВЭУ для МКЭ

характеристикой нагруженности соответствующей i -й точки конкретного сварного шва от m -й составляющей спектра внешней нагрузки.

Кроме внешней нагрузки, в зоне сварных швов действуют остаточные сварочные напряжения σ_{res} . Принималось, что для термообрабатываемых сварных соединений средний по толщине уровень поперечных напряжений $\sigma_{\text{res}} \approx 0,2\sigma_T$, а для нетермо-

Таблица 3. Изменение нагрузок Q_j в зависимости от угла поворота вала α

α , град	$R_{j\alpha} = Q_{j\alpha} / Q_j^{\max}$					
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
0	0,4	0	0,55	0	1,0	0,2
90	0,7	1,0	1,0	1,0	0	0,6
180	1,0	0	0,55	0	-1,0	1,0
270	0,7	-1,0	0,1	-1,0	0	0,6
$R_{j\alpha}^{\min}$	0,4	-1,0	0,1	-1,0	-1,0	0,2



Таблица 4. Величины $\bar{\sigma}_{xx\ in}^{(j)} \cdot 10^3$ и $\bar{\sigma}_{xx\ out}^{(j)} \cdot 10^3$ вдоль сварного соединения № 19 (оси y) при единичных нагрузках Q_j

i	$\bar{\sigma}_{xx\ in}^{(j)} \cdot 10^3$, Па						$\bar{\sigma}_{xx\ out}^{(j)} \cdot 10^3$, Па					
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
1	8894	-2236	-5355	-624	-10770	12910	12790	-1462	-13080	-880	-12460	12660
2	7848	-2427	-3842	94	-10210	12480	12150	-1605	-12270	-174	-12130	12250
3	6639	-2458	-2515	472	-9206	11510	11180	-1620	-11320	197	-11270	11300
4	5459	-2395	-1430	618	-8056	10370	10090	-1549	-10350	335	-10170	10170
5	4404	-2285	-572	637	-6943	9269	9026	-1435	-9422	344	-9039	9082
6	3491	-2148	102	596	-5934	8290	8023	-1305	-8530	294	-7971	8110
7	2707	-1993	634	535	-5037	7430	7082	-1177	-7663	219	-6981	7259
8	2029	-1821	1056	473	-4236	6661	6187	-1060	-6802	137	-6061	6507
9	1441	-1630	1389	420	-3513	5956	5318	-962	-5929	56	-5197	5831
10	929	-1415	1642	380	-2853	5290	4459	-889	-5027	-23	-4376	5213
11	494	-1169	1811	355	-2245	4647	3590	-848	-4076	-104	-3587	4644
12	139	-888	1885	338	-1686	4012	2703	-838	-3068	-187	-2820	4117
13	-112	-542	1822	347	-1174	3369	1776	-876	-1976	-289	-2065	3636
14	-305	-151	1702	339	-686	2720	821	-886	-799	-371	-1316	3173
15	460	625	4	662	-530	1907	1	-1193	99	-669	-690	2900
16	1557	1304	-2375	254	-320	1112	-1152	-779	1557	-279	236	2278
17	-194	778	126	-426	573	982	-1119	-557	1049	-717	680	1642
18	-1439	425	1726	-765	1300	642	-928	-254	405	-1163	1012	1050
19	-1960	383	2078	-1164	1886	185	-895	31	-83	-1514	1449	440
20	-2438	439	2357	-1473	2490	-360	-1031	285	-320	-1796	1956	-198
21	-2998	572	2718	-1605	3186	-1066	-1500	486	-94	-1921	2628	-925

обрабатываемых соединений он примерно равен $0,5\sigma_T$.

При оценке допустимых размеров непроплавления $2a$ делается ряд допущений:

непроплавнение представляет собой плоскую трещину шириной $2a$ и длиной $l \gg a$;

нормаль к плоскости трещины совпадает с направлением действия поперечных напряжений σ_{qq} ;

напряжения σ_{qq} изменяются плавно вдоль сварного шва, поэтому в зоне i -й точки можно принять $P_{im}^{(\alpha)}$ и $M_{im}^{(\alpha)}$ постоянными;

в процессе эксплуатационного нагружения рассматриваемая «трещина» растет только за счет увеличения размеров $2a$;

к концу заданного срока эксплуатации $N = 2 \cdot 10^6$ циклов размеры $2a$ не должны превышать значений $2a_{st}$, значения которых определяются из условий сохранения статического равновесия трещины при квазистатическом приложении экстремальных нагрузок.

Рассмотрим определение критических значений $2a_{st}$.

С учетом хрупковязкого поведения материала в вершине «трещины» для определения критических размеров $2a_{st}$ используется известная процедура R6 [1], рекомендуемая также в [6].

В этом случае величина $2a_{st}$ определяется из решения нелинейного уравнения

$$K_r = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,6L_r^6)],$$

$$K_r = 0 \begin{cases} \text{при } L_r \leq L_{r\ max} \\ \text{при } L_r > L_{r\ max} \end{cases} \quad (3)$$

где $L_r = \sigma_{net} / \sigma_{0,2}$; σ_{net} — эффективное напряжение в нетто-сечении, при котором возможен пластический коллапс; $\sigma_{0,2}$ — расчетное значение

предела текучести материала, равно $\sigma_{0,2}^{nop} / \gamma_M$; $\sigma_{0,2}^{nop}$ — нормированное значение предела текучести материала; γ_M — коэффициент безопасности;

$L_{r\ max} = \frac{\sigma_{0,2}^{nop} + \sigma_B^{nop}}{2\sigma_{0,2}^{nop}}$; σ_B^{nop} — нормированное значение

временного сопротивления материала; $K_r = K_I / K_c$, где K_I — максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений; K_c — расчетное значение критической величины K_I , равное K_c^{nop} / γ_M ; K_c^{nop} — нормированное значение K_c для данного материала.

Для рассмотренных соединений (см. рис. 1) величины $\sigma_{net, i}$ и $K_{I, i}$ можно определить в точке i вдоль сварного шва через номинальные значения усилий P_i и моментов M_i , соответствующие экстремальным нагрузкам по табл. 1, либо по первой строчке $m = 1$ спектра нагрузок по табл. 5, но при различных α , по зависимостям [5]

$$\sigma_{net, i} = \frac{P_i}{W - 2a_{st}^{(i)}} + \frac{6|M_i|}{W^3 - (2a_{st}^{(i)})^3} W, \quad (4)$$

$$K_{I, i} = \left(\frac{P_i}{\delta} + \sigma_{res} \right) B_i \sqrt{\pi a_{st}^{(i)} \sec \frac{\pi a_{st}^{(i)}}{W}} + \frac{3|M_i| a_{st}^{(i)} D_i}{4 \left[\left(\frac{W}{2} \right)^3 - (a_{st}^{(i)})^3 \right]} \sqrt{\pi a_{st}^{(i)} \left(1 - \frac{2a_{st}^{(i)}}{W} \right)}, \quad (5)$$



$$B_i = \frac{A_1 + A_2 a_{st}^{(i)}/W}{1 + 2h/\delta},$$

$$A_1 = 0,528 + 3,287 \frac{h}{\delta} - 4,361 \left(\frac{h}{\delta}\right)^2 + 3,696 \left(\frac{h}{\delta}\right)^3 - 1,875 \left(\frac{h}{\delta}\right)^4 + 0,415 \left(\frac{h}{\delta}\right)^5,$$

$$A_2 = 0,218 + 2,717 \frac{h}{\delta} - 10,171 \left(\frac{h}{\delta}\right)^2 + 13,122 \left(\frac{h}{\delta}\right)^3 - 7,755 \left(\frac{h}{\delta}\right)^4 + 1,783 \left(\frac{h}{\delta}\right)^5,$$

$$D_i = \left[1 + \frac{a_{st}^{(i)}}{W} + \frac{3}{2} \left(\frac{a_{st}^{(i)}}{W}\right)^2 - \frac{11}{2} \left(\frac{a_{st}^{(i)}}{W}\right)^3 + 0,464 \left(\frac{a_{st}^{(i)}}{W}\right)^4 \right];$$

$W = \delta + 2h$ (h определяется по рис. 1).

Расчеты $2a_{st}$ были выполнены для всех соединений при указанных экстремальных нагрузках по табл. 1 и для четырех значений α и нагрузках $m = 1$ по табл. 5. Из восьми вариантов значений $2a_{st}$ выбиралось наименьшее.

В табл. 6 приведены значения $2a_{st}$ для сварного соединения № 19 ($\delta = 50$ мм, $h = 4$ мм). При получении этих данных принималось, что $\sigma_{0,2}^{нор} = 300$ МПа, $\sigma_B^{нор} = 480$ МПа, $K_c^{нор} = 1400$ МПа·мм^{1/2}, $\gamma_M = 1,4$ по [5], как для наиболее сложных ситуаций. Кроме того, принималось ограничение

$$2a_{st} < 0,8W. \quad (6)$$

Видно, что в табл. 6 для зоны $y \geq 1062$ мм значения $2a_{st}$ определены по уравнению (6).

Рассмотрим алгоритм роста трещины-непроявления. Скорость роста рассматриваемого дефекта в i -й точке вдоль сварного соединения определяется при допущении, что всегда имеет место спектр нагрузок по табл. 5.

Следовательно, если вся долговечность разбивается на K этапов прослеживания развития трещины, то на одном этапе количество циклов для m -й составляющей будет $\Delta N_m/K$, где ΔN_m определяется по табл. 5. Тогда скорость от m -й составляющей спектра роста за цикл в i -й зоне сварного шва по [5] имеет вид

$$v_m^{(i)} = \left(\frac{da^{(i)}}{dN}\right)_m = \frac{C_0 \Delta K_{Iim}}{(1 - R_{im}) - \frac{\Delta K_{Iim}}{K_c}} \text{ при } \Delta K_{Iim} \geq \Delta K_{thim}, \quad (7)$$

$$v_m^{(i)} = 0 \text{ при } \Delta K_{Iim} < \Delta K_{thim}, \quad (8)$$

где $C_0 = 5 \cdot 10^{-13}$, $n = 3,0$ при ΔK_{Iim} в МПа·мм^{1/2}, $\Delta K_{Iim} = K_{Iim}^{max} - K_{Iim}^{min}$; $R_{im} = K_{Iim}^{min}/K_{Iim}^{max}$, ΔK_{thim} – расчетное пороговое значение ΔK_{thim} , определяемое в виде $\Delta K_{thim} = \Delta K_{thim}^{(0)}/\gamma_M$; $\Delta K_{thim}^{(0)} = 190 \dots 144 R_{im}$, но не менее 62 МПа·мм^{1/2} по [5, с. 100].

При вычислении K_{Iim}^{max} и K_{Iim}^{min} использовались зависимости (5), т.е. определялись K_{Iim} для

Таблица 5. Значения ΔQ_j в сформированном спектре нагрузок в зависимости от ΔN

m	lg ΔN	ΔN	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4	j = 5	j = 6
			F_x , кН	F_y , кН	F_z , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м
1	0	1	271,8	304,8	304,7	4694	4556	1788
2	1	10	271,8	304,8	252,5	4690	4556	1328
3	2	100	268	304,8	207,2	4600	4556	1296
4	2,5	316	267	304,8	205,6	4570	4556	1270
5	3	1000	266	304,8	204,1	4553	4556	1269
6	3,5	3162	264	304,8	202,9	4506	4556	1198
7	4	10000	262	274,3	201,7	4107	4214	1144
8	4,25	17780	258	259,1	200,4	3943	4009	1090
9	4,5	31620	248	243,8	199,2	3755	3826	1037
10	4,75	56230	220	222,5	198	3567	3645	1010
11	5	100000	217	198,1	195	3380	3417	983
12	5,25	177830	190	183	186	3192	3257	930
13	5,5	316230	177	164,6	176,7	3000	3007	894
14	5,75	562340	163	152,4	170,6	2816	2825	822
15	6	1000000	149	140,2	158,4	2582	2597	778
16	6,25	1778280	129	128	143,2	2394	2392	715
17	6,5	3162280	115	114,3	128	2159	2164	681
18	6,75	5623410	103	99,1	115,3	2018	2005	590
19	7	10000000	97	91,4	97,5	1784	1822	536
20	7,25	17783000	81,5	79,2	82,3	1596	1595	492
21	7,5	31624000	68	67,6	70,1	1338	1367	393
22	7,75	56234000	58	54,8	54,8	1126	1113	358
23	8	100000000	47	45,7	42,6	938,8	911	304



Таблица 6. Расчетные значения $2a_{st}$ и $[2a^{(i)}]$ для сварного соединения № 19 вдоль сварного шва

y , мм	$2a_{st}$, мм	$[2a^{(i)}]$, мм	y , мм	$2a_{st}$, мм	$[2a^{(i)}]$, мм
885,3	36,5	3,3	1062	46,4	11,9
910,6	36,8	3,6	1087	46,4	14,0
936	38,1	4,4	1112	46,4	16,3
961	39,8	5,6	1138	46,4	18,9
986	41,7	6,9	1163	46,4	22,0
1011	43,4	8,5	1188	46,4	25,0
1037	45,1	10,1	1390	46,4	23,1

четырёх положений вала, характеризующихся углом α . Из этих значений находили K_{Iim}^{max} и K_{Iim}^{min} . Если $K_{Iim}^{min} < 0$, то принималось K_{Iim}^{min} , поскольку в условиях сжатия трещина усталости практически не развивается, т.е. в этом случае $R_{im} = 0$.

Поскольку обычно на уровне $\Delta K_I = \Delta K_{th}$ для конструкционных сталей скорость роста трещины $v \approx 10^{-8}$ мм/цикл, что для базы долговечностей $N < 10^7$ циклов использование условия (8) не приводит к существенным погрешностям, то на базе $N = 2 \cdot 10^8$ циклов это условие лучше (консервативнее) записать в виде

$$v_m^{(i)} = 10^{-8} \text{ мм/цикл при } \Delta K_{Iim} < \Delta K_{thim}. \quad (8')$$

Полное приращение размера $\Delta a_k^{(i)}$ на k -м шаге прослеживания $k = 1, 2, \dots, K$

$$\Delta a_{ik} = \sum_{m=1}^{23} v_m^{(i)} \frac{\Delta N_m}{K} \quad (9)$$

соответственно

$$a_k^{(i)} = a_{k-1}^{(i)} + \Delta a_k^{(i)}, \quad (10)$$

если прослеживание ведется от заданных начальных $a_0^{(i)}$ размеров непроплавления.

The calculation algorithm for estimation of permissible lacks of penetration in welded joints under cyclic loading using a complex range of loads (forces and moments) on a base of $2 \cdot 10^8$ cycles is considered with respect to welded joints in frames of wind-driven power plants. The use is made of the experimental data on a range of amplitudes of six types of loads by Q_j ($j = 1, \dots, 6$), as well as the numerical solution for nominal membrane and bending stresses in the weld zone induced by single loads Q_j , according to which stresses in the HAZ induced by all loads at a given loading cycle are synthesised by superposition.

При этом должно соблюдаться неравенство $2a_k^{(i)} < 2a_{st}^{(i)}$.

Такая последовательность удобна при оценке допустимости конкретных размеров $2a$ выявленных дефектов. Если же ставится задача определить допустимые значения $[2a^{(i)}]$ при заданных условиях нагружения, когда можно вычислить $2a_{st}^{(i)}$, то удобнее процесс вести в обратном порядке $a_0^{(i)} = a_{st}^{(i)}$ соответственно $a_0^{(i)} = a_{st}^{(i)} - \Delta a_1^{(i)}$ и т.д. до $k = K$, т.е. в этом случае

$$[2a^{(i)}] = 2a_k^{(i)}. \quad (11)$$

Количество циклов прослеживания (интегрирования) K выбирается по правилам численного интегрирования.

Описанный алгоритм был применен для всех 60 сварных соединений рассматриваемой рамы ВЭУ.

Из табл. 6 видно, что $[2a^{(i)}]$ по длине сварного шва может изменяться в достаточно широких пределах. Наличие таких данных для всех сварных соединений рамы позволяет рационально построить ее ремонт спозиций сохранения размерной стабильности.

1. *Harrison R. P., Loosemore K., Milne J. et al.* Assessment of the integrity of structure containing defects // Report P/H R6. Rev 2 of Central Electricity Generating Board. — Bekerley, 1980. — 193 p.
2. *Harrison J. D.* Fracture mechanics developments related to the weld defect acceptance methods given in British standard PD 6493, Fract. and Fract. Mech.: case Stud // Proc. 2nd Mat. conf., Johannesburg, 27–27 Nov., 1984. — P. 195–207.
3. *Методика* расчета допустимых дефектов металла оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС. М-01-88. — М.: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники, 1986. — 32 с.
4. *МР-125-01-90.* Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослабления сечений для дефектов в сварных соединениях. — Киев, 1990. — 56 с.
5. *Recommendations* for fatigue design of welded joints and components. — (Intern. Inst. of Welding). Doc. XIII [S.I.], [1996]. — 154 p.
6. *IIV Guidance* on assessment of the fitness for purpose of welded structures. IIV/IIS-SST-1157-90. — 322 p.

Поступила в редакцию 23.02.2005



ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ

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

Разработана оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния, проходящими от стержня к стержню магнитопровода. Модель позволяет рассчитывать оптимальные по массе, объему и стоимости трансформаторы как с подвижными, так и с неподвижными обмотками при обеспечении заданного значения индуктивности рассеяния.

Ключевые слова: трансформатор, поперечные магнитные потоки рассеяния, индуктивность рассеяния, параметры, сварочная техника, оптимизация

Однофазные трансформаторы с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния, проходящими от стержня к стержню магнитопровода, являются наиболее распространенными в сварочных источниках питания для сварки штучными электродами. Теория их расчета разработана в Институте электросварки им. Е. О. Патона В. К. Лебедевым и опубликована в работах [1–4]. Развитием этой теории явились исследования по распределению магнитных потоков в трансформаторе [5] и модернизация методики расчета индуктивностей рассеяния [6]. Вопросы оптимизации таких трансформаторов рассматривались в работе [7], однако в ней необходимо рассчитывать большое количество вариантов при отыскании оптимального трансформатора.

Полное разделение зависимых и независимых переменных в оптимизационной модели трансформатора с жесткой внешней характеристикой осуществил И. В. Пентегов при аналитическом расчете оптимального трансформатора [8–13], что позволило однозначно находить оптимальный вариант. Однако эти методики применительно к рассматриваемому трансформатору не гарантируют получения оптимального варианта с нужным уровнем индуктивности рассеяния. Аналитически эта задача так и не была решена из-за наличия жестко закрепленного параметра — заданного значения индуктивности рассеяния, учет которого явился существенной проблемой при дифференцировании оптимизационной функции. Задачу решили с помощью разработанной оптимизационной модели, предназначенной для численных методов оптимизации.

Целью работы является описание разработанной оптимизационной модели однофазного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния с подвижными и неподвижными обмотками, жестким ограничением по заданному уровню индуктивности рассеяния и полным разделением зависимых и независимых переменных.

Развитые поперечные потоки рассеяния в рассматриваемом трансформаторе обеспечиваются раз-

несением первичной и вторичной обмотки по длине стержней магнитопровода (рисунок), благодаря чему потоки проходят от стержня к стержню. Индуктивность рассеяния плавно изменятся в результате раздвижения обмоток по высоте стержней. При сближении обмоток индуктивность рассеяния уменьшается, при разведении — увеличивается (соответственно увеличивается и уменьшается сварочный ток). На рисунке приведены следующие обозначения: a , b — толщина и ширина стержня магнитопровода; $h_{ок}$, $l_{ок}$ — высота и ширина окна магнитопровода; $h_{к1}$ и $h_{к2}$, $C_{к1}$ и $C_{к2}$, $C_{к01}$ и $C_{к02}$ — соответственно высота, толщина и общая толщина катушек с первичной и вторичной обмотками; $l_{к1}$, $l_{к2}$ — задаваемые расстояния между боковыми поверхностями катушек с первичными и вторичными обмотками в окне магнитопровода; Δh_1 , Δh_2 — задаваемые длины выступающих из катушек с пер-

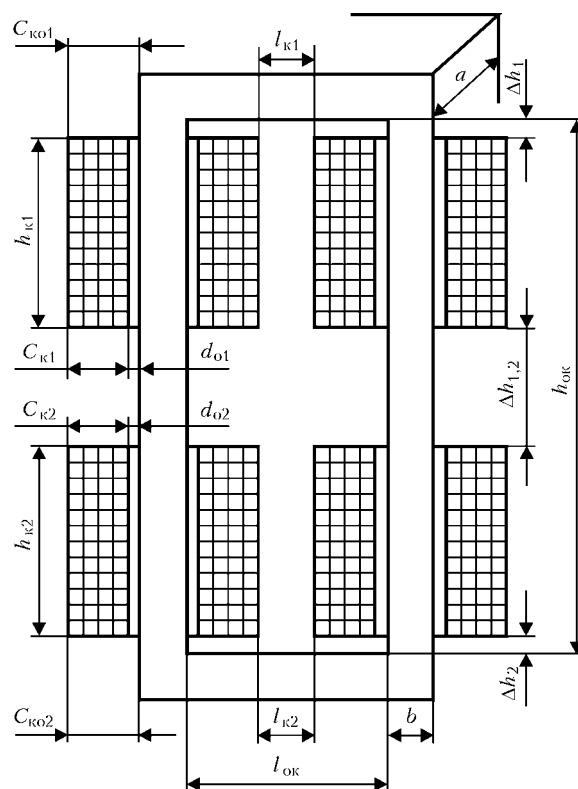


Схема однофазного трансформатора с поперечными магнитными потоками рассеяния (обозначения см. в тексте)



вичной и вторичной обмоткой частей стержня магнитопровода; $\Delta h_{1,2}$ — расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками; d_{o1} , d_{o2} — задаваемые расстояния между стержнями магнитопровода и первичной и вторичной обмотками.

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор, питающийся от промышленной сети с синусоидальным напряжением. Эффектом вытеснения тока к поверхности проводников обмоток пренебрегаем. При оптимизации рассмотрим только активные материалы трансформатора — электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников его обмоток.

Оптимизационная модель трансформатора представляет собой процедуру глобального цикла, которая начинается с присвоения промежуточной переменной F' стартового значения оптимизационной функции F , а при последующих обращениях — присвоение значения оптимизационной функции, вычисленной на предыдущем шаге прохождения цикла:

$$F' = F. \quad (1)$$

Задается также начальное значение шага по виткам первичной обмотки трансформатора (при начальном значении количества витков первичной обмотки трансформатора w_1) $\Delta w = 0,1w_1$, после чего следуют выражения первого локального цикла, начинающегося с вычисления активного поперечного сечения стержня и ярма магнитопровода [14]:

$$S_c = \sqrt{2} U_1 / (\omega w_1 B_m), \quad (2)$$

где U_1 — заданное действующее значение напряжения на первичной обмотке трансформатора; ω — угловая частота напряжения питающей сети, рассчитываемая по заданному значению частоты сети f_c , равная $2\pi f_c$; B_m — задаваемое амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе.

Толщина стержня и ярма магнитопровода равна [14]

$$a = S_c / (k_c b), \quad (3)$$

где k_c — задаваемый коэффициент заполнения магнитопровода пластинами электротехнической стали.

Поперечные сечения активного материала первичной и вторичной обмотки в окне магнитопровода [13] определяются из соотношения

$$S_{o1} = w_1 I_{1дл} / J_{1дл}; S_{o2} = w_1 I_{2дл} / (k_{тр} J_{2дл}), \quad (4)$$

где $I_{1дл}$, $I_{2дл}$ и $J_{1дл}$, $J_{2дл}$ — длительные действующие значения соответственно токов и задаваемых плотностей токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора; $k_{тр}$ — коэффициент трансформации, равный U_1 / U_2 ; U_2 — заданное действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке в режиме холостого хода.

Длительные действующие значения фазных токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора равны

$$I_{1дл} = I_1 \sqrt{X/100 \%}; I_{2дл} = I_2 \sqrt{X/100 \%}, \quad (5)$$

где I_1 , I_2 — действующие значения токов в первичной [15] и вторичной обмотках трансформатора (ток I_2 для сварочных трансформаторов обычно задается); X — заданная продолжительность включения трансформатора, %.

Высота катушки с первичной обмоткой равна

$$h_{к1} = S_{o1} / (2k_{o1} C_{к1}), \quad (6)$$

где k_{o1} — коэффициент заполнения первичной обмотки проводниковым материалом ($k_{o1} = 0,5 \dots 0,95$).

Общая толщина катушки с первичной обмоткой равна

$$C_{кo1} = d_{o1} + C_{к1}; \quad (7)$$

ширина окна магнитопровода определяется из выражения

$$l_{ок} = 2C_{кo1} + l_{к1}; \quad (8)$$

толщина катушки со вторичной обмоткой равна

$$C_{к2} = (l_{ок} - l_{к2}) / 2 - d_{o2}; \quad (9)$$

общая толщина катушки со вторичной обмоткой

$$C_{кo2} = d_{o2} + C_{к2}; \quad (10)$$

высота катушки со вторичной обмоткой

$$h_{к2} = S_{o2} / (2k_{o2} C_{к2}), \quad (11)$$

где k_{o2} — коэффициент заполнения вторичной обмотки проводниковым материалом.

Средние длины витков первичной и вторичной обмотки определяются из соотношений

$$\begin{aligned} l_{ср.в1} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{o1} + C_{к1}/2); \\ l_{ср.в2} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{o2} + C_{к2}/2). \end{aligned} \quad (12)$$

По формулам (1), (10) и (21) из работы [6] вычисляются наименьшие значения индуктивностей трансформатора (L_k^{\min} — индуктивность рассеяния (индуктивность короткого замыкания); L_s^{\min} — индуктивность рассеяния поперечных потоков, распространяющихся между стержнями магнитопровода, ΔL_l^{\min} — составляющая индуктивности лобового потока рассеяния, проходящего от торца к торцу каждой катушки вне магнитопровода, при задаваемом минимальном расстоянии между обмотками $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1,2}^{\min}$) и уточняется количество витков первичной обмотки трансформатора:

$$w_1 = \begin{cases} w_1 + \Delta w, & \text{если } L_k^{\min} < L_{к.з}^{\min}, \\ w_1 - \Delta w, & \text{если } L_k^{\min} > L_{к.з}^{\min}, \end{cases} \quad (13)$$

где $L_{к.з}^{\min}$ — наименьшее заданное значение индуктивности рассеяния.

Выражение (13) образует подцикл, при входе в который нужно использовать только одно из его текущих условий с неизменным значением Δw , с пересчетом значения L_k^{\min} на каждом шаге. Подцикл необходимо выполнять до тех пор, пока текущее условие истинно. После этого уменьшается значение шага по виткам первичной обмотки $\Delta w =$



$= 0,5\Delta\omega$. Условие по выходу из первого локального цикла имеет вид

$$|L_{к.3}^{\min} - L_{к.3}^{\min}|/L_{к.3}^{\min} < \varepsilon_1, \quad (14)$$

где ε_1 — задаваемая точность вычислений в первом локальном цикле.

Выражения (2)–(14) образуют первый локальный цикл, который выполняется до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (14).

Для обеспечения наибольшего заданного значения индуктивности рассеяния $L_{к.3}^{\min}$ необходимо определить максимальное расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1,2}^{\max}$.

Начальное значение индуктивности рассеяния между стержнями магнитопровода трансформатора вычисляется по формуле (1) из работы [6]

$$L_s^{\max'} = L_{к.3}^{\max} - \Delta L_{л}^{\min},$$

где вместо $L_{л}^{\max}$ фигурирует $\Delta L_{л}^{\min}$, вычисленная ранее при $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1,2}^{\min}$, поскольку значение $\Delta h_{1,2}^{\max}$ еще неизвестно. В рассматриваемом случае начальное значение $\Delta h_{1,2}^{\max}$, полученное по формуле (10) из работы [6], решенной относительно $\Delta h_{1,2}$, равно

$$\Delta h_{1,2}^{\max} = L_s^{\max'} / (\mu_0 \omega^2 g_y) - (h_{к1} + h_{к2})/3,$$

где μ_0 — магнитная постоянная; g_y — удельная геометрическая проводимость между стержнями магнитопровода.

Начальное значение по определению расстояния между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками $\Delta h_{1,2}^{\max}$ равно $\Delta_{1,2} = 0,1\Delta h_{1,2}^{\min}$.

Для уточнения значения $\Delta h_{1,2}^{\max}$ используется второй локальный цикл, начинающийся с вычисления значений индуктивностей рассеяния трансформатора L_s^{\max} , $\Delta L_{л}^{\max}$ и $L_{к.3}^{\max}$ соответственно по формулам (1), (10), (21) из работы [6], при подстановке в них значения $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}^{\max}$:

$$\Delta h_{1,2}^{\max} = \begin{cases} \Delta h_{1,2}^{\max} + \Delta_{1,2}, & \text{если } L_{к.3}^{\max} < L_{к.3}^{\max}, \\ \Delta h_{1,2}^{\max} - \Delta_{1,2}, & \text{если } L_{к.3}^{\max} > L_{к.3}^{\max}. \end{cases} \quad (15)$$

Выражение (15) образует подцикл, при входе в который нужно использовать только одно из его текущих условий при неизменном значении $\Delta_{1,2}$ с пересчетом $\Delta h_{1,2}^{\max}$ на каждом шаге. Подцикл выполняется до тех пор, пока истинно текущее условие подцикла. После этого уменьшается значение шага $\Delta_{1,2} = 0,2\Delta_{1,2}$ и проверяется выполнение условия по выходу из второго локального цикла:

$$|L_{к.3}^{\max} - L_{к.3}^{\max}|/L_{к.3}^{\max} < \varepsilon_2, \quad (16)$$

где ε_2 — задаваемая точность вычислений во втором локальном цикле.

Выражения (15) и (16) образуют второй цикл, который выполняется до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (16).

После этого определяется высота окна магнитопровода

$$h_{ок} = \Delta h_1 + h_{к1} + \Delta h_{1,2}^{\max} + h_{к2} + \Delta h_2, \quad (17)$$

средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе

$$l_c = 2(h_{ок} + l_{ок}) + 4b, \quad (18)$$

объем, масса и стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток

$$V_c = l_c S_c; M_c = \gamma_c V_c; C_c = c_c M_c; \quad (19)$$

$$V_o = l_{ср.в1} S_{o1} + l_{ср.в2} S_{o2}; M_o = \gamma_o V_o; C_o = c_o M_o, \quad (20)$$

где γ_c, γ_o — плотность активных материалов магнитопровода и обмоток; c_c, c_o — удельная стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток, у.е./кг (у.е. — условная денежная ед.).

Объем, масса и стоимость активных материалов трансформатора определяются соотношениями:

$$V = V_c + V_o; M = M_c + M_o; C = C_c + C_o. \quad (21)$$

Оптимизационная функция трансформатора имеет вид [13]

$$F = M_c + k_g M_o, \quad (22)$$

где k_g — обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала магнитопровода и обмоток.

Условие по выходу из глобального цикла имеет вид

$$|F - F'|/F < \varepsilon, \quad (23)$$

где ε — задаваемая точность вычислений в глобальном цикле.

Из анализа оптимизационной модели трансформатора (1)–(23) можно заключить, что независимыми переменными в ней являются два значения: b и $C_{к1}$, все остальные являются заданными или зависимыми. Независимые переменные определяются в результате минимизации функции F . Минимальные значения оптимизационной функции могут быть найдены с помощью численных методов оптимизации, например, метода Гаусса – Зейделя (покоординатного спуска) [16] при заданных начальных значениях независимых переменных b и $C_{к1}$. В результате минимизации функции F определяются оптимальные значения переменных $b, C_{к1}$ и остальные величины, входящие в оптимизационную модель.

При коэффициенте $k_g = 1$ расчет трансформатора ведется на минимум массы активных материалов, при γ_c/γ_o — на минимум объема активных материалов, при c_o/c_c — на минимум стоимости активных материалов. В общем случае коэффициент k_g может принимать и любые другие значения [13].

При оптимизационном расчете трансформаторов с неподвижными обмотками можно использовать полученную оптимизационную модель, но исключить из нее выражения (15), (16), вычисляющие максимальное расстояние между торцами



катушек с первичной и вторичной обмотками $\Delta h_{1,2}^{\max}$ для обеспечения наибольшего значения индуктивности рассеяния L_{κ}^{\max} и убрать индексы min и max в оставшихся выражениях (13), (14) и (17).

Разработанную оптимизационную модель применяли для расчета трансформаторов сварочных источников питания, созданных в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Приведем данные сварочного трансформатора с подвижными обмотками, рассчитанного с помощью разработанной оптимизационной модели на минимум массы активных материалов. Эти данные могут быть использованы при изготовлении трансформатора с плавным регулированием тока для сварки штучными электродами, предназначенного для ремонтных мастерских и бытовых целей.

Трансформатор имеет следующие параметры: $U_1 = 220$ В; $U_2 = 60$ В; $f_c = 50$ Гц; $X = 25$ %; $k_{\text{тр}} = 3,667$; $L_{\kappa}^{\min} = 13,91$ мГн, $L_{\kappa}^{\max} = 31,22$ мГн (приведенные к первичной обмотке) с возможностью регулирования сварочного тока в пределах $I_2 = 75 \dots 160$ А. Далее приведены значения параметров для номинального тока 160 А: $I_1 = 45,58$ А; $I_{\text{дл}} = 23,76$ А; $J_{\text{дл}} = 2,27$; $J_{2\text{дл}} = 2,58$ А/мм²; ток холостого хода — 1,943 А (4,26 %); мощность трансформатора 9,6 кВ·А; напряжение на дуге 26,4 В; КПД 94 %; $B_m = 1,63$ Тл; электротехническая сталь 3414 толщиной 0,35 мм; $c_s = 1,4$ у.е./кг; обмотки из меди; $c_o = 3,3$ у.е./кг; $M_c = 22,5$ кг; $M_o = 11,7$ кг; $M = 34,2$ кг; $C_c = 27$ у.е.; $C_o = 28$ у.е.; $C = 55$ у.е.

Параметры обмоток: соединение катушек первичной обмотки — последовательное, $w_1 = 198$ (количество витков в одной катушке 99, в слое 13, в последнем слое 8, слоев 8); соединение катушек вторичной обмотки — параллельное (катушки — подвижные), $w_2 = w_1/k_{\text{тр}} = 54$ (количество витков в одной катушке 54, в слое 14, в последнем слое 12, слоев 4); проводник первичной обмотки размером 2,65×4 мм (толщина изоляции на две стороны 0,27 мм); проводник вторичной обмотки размером 3,15×6 мм (толщина изоляции на две стороны 0,5 мм); толщина межслойной изоляции 0,15 мм; длина провода первичной обмотки 66,5, вторичной 19,5 м.

Геометрические размеры трансформатора: $a = 65$ мм; $b = 50$ мм; $h_{\text{ок}} = 310$ мм; $l_{\text{ок}} = 75$ мм; $h_{\kappa 1} = 63$ мм; $C_{\kappa 1} = 26$ мм; $C_{\kappa o 1} = 29$ мм; $h_{\kappa 2} = 87$ мм; $C_{\kappa 2} = 18$ мм; $C_{\kappa o 2} = 28$ мм; $l_{\kappa 1} = 16$ мм; $l_{\kappa 2} = 18$ мм; $d_{o 1} = 3$ мм; $d_{o 2} = 10$ мм; $\Delta h_1 = D h_2 = 6$ мм; $\Delta h_{1,2}^{\min} = 8$ мм; $\Delta h_{1,2}^{\max} = 148$ мм; габаритные размеры трансформатора 230×130×405 мм.

Тепловые характеристики: средняя температура первичной обмотки 140, вторичной 130, магни-

топровода 75 °С при температуре окружающей среды 40 °С, класс изоляции F [14].

Закключение. Предложена оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния с подвижными и неподвижными обмотками с полным разделением зависимых и независимых переменных.

Модель позволяет оптимизировать трансформатор на минимум массы, объема или стоимости его активных материалов при обеспечении заданных значений индуктивности рассеяния. Оптимизационная модель будет полезна разработчикам новых сварочных источников питания.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Элементы расчетов цепей и аппаратов переменного тока для дуговой сварки. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953. — 146 с.
2. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 360 с.
3. Лебедев В. К., Корицкий В. А. К расчету сопротивления короткого замыкания сварочного трансформатора с подвижной обмоткой // Автомат. сварка. — 1961. — № 7. — С. 21–24.
4. Лебедев В. К., Корицкий В. А. Потери энергии в кожухах сварочных трансформаторов с развитым рассеянием // Там же. — 1965. — № 7. — С. 1–6.
5. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета трансформаторов с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния // Техн. электродинамика. — 1997. — № 2. — С. 41–48.
6. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния // Электротехника и электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 38–45.
7. Федер Е. С., Песенсон А. Е. К расчету трансформаторов с подвижными обмотками для дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1965. — № 7. — С. 7–10.
8. Пентегов И. В. К расчету трансформаторов для контактной сварки // Там же. — 1962. — № 9. — С. 13–17.
9. Пентегов И. В. Определение оптимальных размеров трансформаторов // Изв. вузов. Электромеханика. — 1960. — № 8. — С. 69–76.
10. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Расчет сварочного трансформатора для контактной конденсаторной сварки // Там же. — 1980. — № 3. — С. 26–30.
11. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Определение оптимального числа вторичных витков трансформаторов для контактной сварки на переменном токе и для конденсаторной сварки // Там же. — 1981. — № 4. — С. 11–15.
12. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Определение оптимальных параметров сварочных трансформаторов контактных машин с заданным сопротивлением обмоток // Автомат. сварка. — 1983. — № 11. — С. 35–40.
13. Пентегов И. В., Рымар С. В., Стежковский Е. П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Техн. электродинамика. — 2002. — № 1. — С. 22–28.
14. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.
15. Рымар С. В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния // Автомат. сварка. — 2005. — № 7. — С. 32–35.
16. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 400 с.

An optimization model of a single-phase transformer with intensive transverse leakage fluxes flowing from core to core in the magnet core has been developed. The model allows calculation of transformers optimum by weight, volume and cost, both with mobile and with stationary windings, while ensuring the specified value of leakage inductance.

Поступила в редакцию 26.10.2004



ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОПЛАМЕННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ

В. Н. КОРЖ, д-р техн. наук, **Ю. С. ПОПИЛЬ**, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Рассмотрено влияние состава горючей смеси и характера течения ее на энергетическое состояние напыляемой частицы. Определены условия получения газопламенных покрытий из материалов с различной температурой плавления при использовании водородно-кислородного пламени, которое получают при сжигании смеси, вырабатываемой электролизно-водяными генераторами.

Ключевые слова: водородно-кислородное пламя, электролизно-водяной генератор, ламинарное течение, турбулентное течение, скорость частиц, прочность сцепления, пористость покрытия

Одним из условий получения качественного газопламенного покрытия является обеспечение необходимого уровня энергии частиц напыляемого материала на поверхности изделия. Энергетическое состояние частиц определяется суммой энергий — тепловой, характеризующейся температурой нагрева, и кинетической [1–3].

При газопламенном напылении порошковым материалом частица напыляемого материала нагревается до температуры пластического состояния или температуры плавления за счет конвективного теплообмена между продуктами горения факельного пламени и частицей. Это происходит в интервале эффективных температур, где температура продуктов горения на 300 °С выше температуры плавления [4]. Участок факела, на котором температура частицы не ниже температуры плавления материала и не охлаждается ниже этой температуры, определяет рабочую зону факела пламени для газопламенного нанесения покрытий.

Исследования, проведенные на кафедре восстановления деталей машин сварочного факультета НТУУ «Киевский политехнический институт» [5], показали, что длина зоны эффективных температур и рабочей зоны зависит от характера горения факела пламени и состава горючей смеси. Для водородно-кислородного пламени, получаемом при сжигании смеси, вырабатываемой электролизно-водяным генератором, длина зоны эффективных температур при напылении материалов с температурой плавления до 1000 °С и больше при ламинарном характере течения продуктов горения. Причем она увеличивается, если в смесь паров добавляют углеводородные соединения.

При напылении материалов с температурой плавления свыше 1000 °С длина зоны эффективных температур больше при турбулентном течении струи продуктов горения.

Распределение скорости потока продуктов горения по длине факела пламени находили экспериментально-расчетным методом. При расчете использовали экспериментальные данные распре-

деления по длине факела температуры [5, 6] и напорного давления газовой струи продуктов горения, которые получали с помощью водоохлаждаемого зонда (трубки Пито–Прандтля) [7]. Максимальную скорость напыляемых частиц определяли экспериментально с помощью прибора ИССО-1 [8]. Экспериментальные данные от расчетных отличались на ±5 %.

Исследовали влияние состава горючей смеси и характера течения продуктов горения на скорость напыляемых частиц грануляцией соответственно 20...40, 20...63 и 63...100 мкм порошков меди, железа (ПЖ-1) и никелевого сплава (ПГ-АН-33). Указанные материалы выбраны на основании анализа широко используемых при газотермическом нанесении покрытий порошковых материалов с различным диапазоном температур плавления, характерном для газопламенного способа напыления.

Анализ распределения скорости частиц движения W_c по длине газового факела показал, что в нем имеют место три зоны: разгона, где частица приобретает скорость от минимальной до максимальной; стабильного движения, где скорость изменяется в пределах 5...10 %; торможения, где скорость частицы уменьшается.

Исследование скорости движения частиц порошка меди показало, что при ламинарном характере течения продуктов горения водородно-кислородной смеси (ВКС) и ВКС + 16 % паров этилового спирта максимальную скорость движения частицы приобретают на расстоянии $L = 300$ мм от среза мундштука горелки, а при сжигании смеси ВКС + 5,5 % паров бензина — на расстоянии 250 мм. Максимальная скорость движения частиц при напылении порошка грануляцией 20...40 мкм и ламинарном течении продуктов горения ВКС составляет 95 м/с на расстоянии 250 мм.

Добавка в горючую смесь паров углеводородных соединений повышает скорость движения частиц до 117 м/с (рис. 1, а). При ламинарном характере течения продуктов горения ВКС и ВКС + 16 % паров спирта зона разгона частиц является самой протяженной, а зона стабильного движения частицы практически отсутствует и образуется только при сжигании смеси ВКС+5,5 % паров бензина.

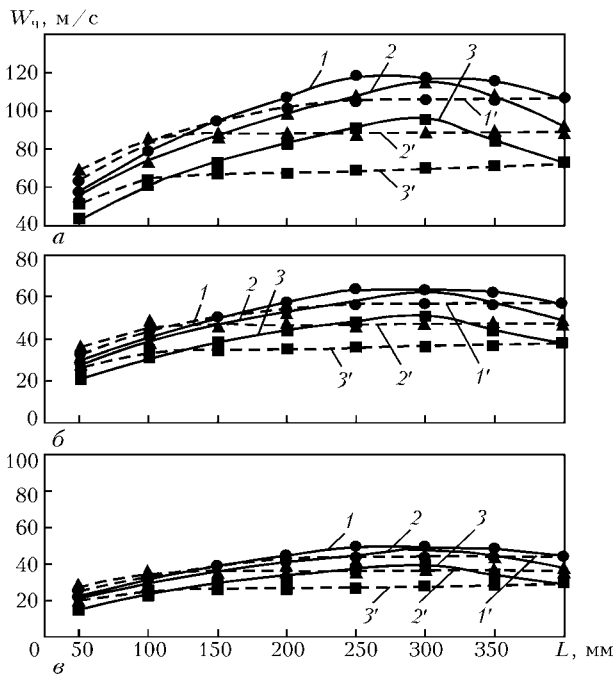


Рис. 1. Зависимость скорости $W_{ч}$ движения частиц порошка грануляцией 20... 40 (а), 20... 63 (б) и 63... 100 мкм (в) от длины газового факела соответственно при ламинарном (1-3) и турбулентном (1'-3') течении потока: 1, 1' — ВКС + 5,5 % паров бензина; 2, 2' — ВКС + 16 % паров спирта; 3, 3' — ВКС

При переходе характера течения газовой струи в турбулентный зона разгона сокращается до 100... 150 мм, т. е. она практически в 2 раза меньше, чем при ламинарном. Соответственно максимальная скорость разгона частиц на 10 % ниже (табл. 1). Зона стабильного движения частицы распространяется практически на всю рабочую длину факела, что остается после зоны разгона (рис. 1).

При увеличении грануляции сохраняется общая закономерность распределения скорости движения частиц по длине факела, но максимальная скорость движения существенно уменьшается (рис. 1, б, в).

Исследования скорости движения частиц порошка железа показали, что характер ее распределения по длине факела по сравнению с порошком меди не изменяется, но скорость частиц порошка железа больше. Максимальная скорость движения частиц порошка железа грануляцией 20... 40 мкм достигается при ламинарном характере течения продуктов горения смеси ВКС + 5,5 % паров бензина и ВКС + 16 % паров спирта на расстоянии от среза мундштука горелки около 250... 300 мм (рис. 2) и составляет 125 м/с.

Анализ скорости движения частиц при использовании порошка никелевого сплава (ПГ-АН-33) (рис. 2, табл. 3) показал, что они в газовом потоке продуктов горения сохраняют общую закономерность движения, как и в других исследуемых материалах. Максимальная скорость движения частиц меньше по сравнению с порошком железа и больше, чем у порошка меди. Так, у порошка грануляцией 20... 40 мкм при сгорании смеси ВКС + 5,5 % паров бензина и ламинарном характере течения струи продуктов горения максимальная скорость движения частиц достигает приблизительно 120 м/с.

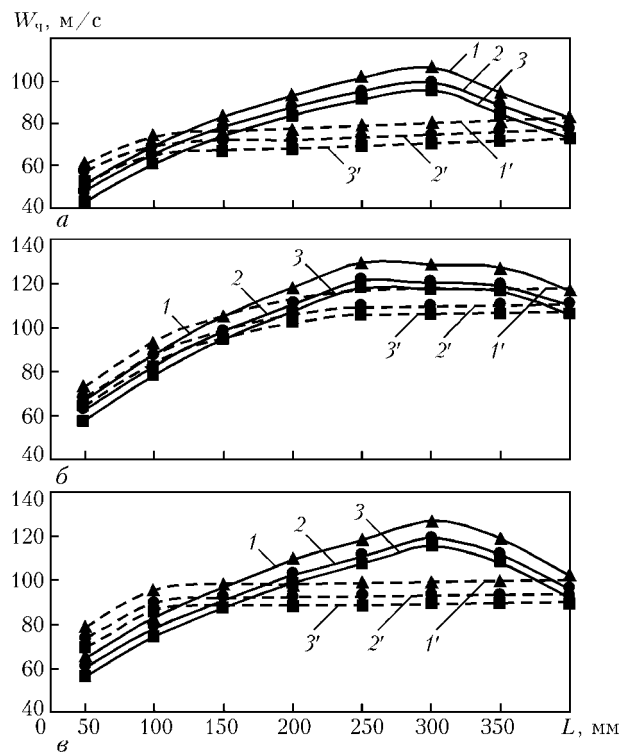


Рис. 2. Влияние состава горючих смесей ВКС (а), ВКС + 5,5 % паров бензина (б) и ВКС + 16 % паров спирта (в) на скорость движения частиц порошков грануляцией 20... 40 мкм при ламинарном (1-3) и турбулентном (1'-3') характере течения потока: 1, 1' — порошок меди; 2, 2' — железа ПЖ-1; 3, 3' — никелевого сплава ПГ-АН-33

При добавлении в горючую смесь паров бензина имеет место ярко выраженная зона стабильного движения частицы, а их максимальная скорость движения больше, чем при использовании других газовых смесей.

Исходя из энергетического состояния напыляемых частиц вероятность получения качественного покрытия из различных металлов можно оценить, проанализировав длину рабочей зоны факела пламени $L_{з.р}$, зону разгона $L_{з.р.ч}$ и стабильного движения частиц $L_{з.с.д.ч}$, а также максимальную скорость движения напыляемых частиц на границе рабочей зоны. Имеется три варианта соотношения между рабочей зоной факела пламени и скоростными зонами, по которым можно оценить возможность получения качественного покрытия:

$$\begin{aligned} L_{з.р} &= L_{з.р.ч} + L_{з.с.д.ч}; \\ L_{з.р} &< L_{з.р.ч} + L_{з.с.д.ч}; \\ L_{з.р} &> L_{з.р.ч} + L_{з.с.д.ч}. \end{aligned}$$

Анализ длины рабочей зоны факела, зон разгона и стабильного движения частицы с учетом максимальной скорости напыляемых частиц на границе рабочей зоны (табл. 2) показал, что получение качественного покрытия наиболее вероятно при напылении порошка меди грануляцией 20... 40 мкм и ламинарном характере течения продуктов горения ВКС + 5,5 % паров бензина и ВКС + 16 % паров спирта (табл. 2, варианты № 3 и 5) с оптимальной дистанцией напыления около 300 мм. В этом случае энергетическое состояние напыляемой частицы является максимальным: скорость движения на гра-



Таблица 1. Максимальные скорости движения частиц порошка различных металлов (м/с) в зависимости от их грануляции и характера течения струи продуктов горения

Состав продуктов горения	Грануляция порошка, мкм					
	20...40		20...63		63...100	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Порошок меди						
ВКС	$\frac{95}{70}$	$\frac{90}{65}$	$\frac{50}{35}$	$\frac{45}{30}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{35}{25}$
ВКС + пары бензина	$\frac{117}{105}$	$\frac{110}{100}$	$\frac{65}{55}$	$\frac{65}{50}$	$\frac{50}{45}$	$\frac{45}{35}$
ВКС + пары спирта	$\frac{115}{90}$	$\frac{110}{85}$	$\frac{60}{50}$	$\frac{55}{45}$	$\frac{45}{35}$	$\frac{40}{30}$
Порошок железа ПЖ-1						
ВКС	$\frac{105}{80}$	$\frac{100}{75}$	$\frac{60}{40}$	$\frac{55}{35}$	$\frac{50}{30}$	$\frac{45}{25}$
ВКС + пары бензина	$\frac{127}{117}$	$\frac{120}{110}$	$\frac{70}{65}$	$\frac{65}{60}$	$\frac{60}{50}$	$\frac{55}{45}$
ВКС + пары спирта	$\frac{125}{100}$	$\frac{120}{95}$	$\frac{70}{60}$	$\frac{65}{55}$	$\frac{55}{45}$	$\frac{50}{40}$
Порошок никелевого сплава ПГ-АН-33						
ВКС	$\frac{102}{75}$	$\frac{95}{70}$	$\frac{55}{40}$	$\frac{50}{35}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{35}{25}$
ВКС + пары бензина	$\frac{120}{110}$	$\frac{115}{105}$	$\frac{65}{60}$	$\frac{60}{55}$	50	45
ВКС + пары спирта	$\frac{120}{95}$	$\frac{115}{90}$	$\frac{65}{50}$	$\frac{60}{45}$	$\frac{50}{38}$	$\frac{45}{30}$

Примечания. 1. В числителе приведены значения при ламинарном характере течения газового потока; в знаменателе — при турбулентном. 2. Измерение экспериментальным методом проводили при длине факела 400 мм при ламинарном характере течения струи продуктов горения и 150... 200 мм при турбулентном.

нице рабочей зоны больше 100 м/с; длина рабочей зоны 300 мм; зоны разгона частицы и стабильного движения соизмеримы с длиной рабочей зоны.

В случае турбулентного характера течения продуктов горения длина рабочей зоны пламени при напылении меди сокращается до 160 мм. И хотя зона разгона частиц порошка с ней соизмерима, максимальная скорость движения частицы на границе рабочей зоны больше 50 м/с только у частиц грануляцией 20... 40 мкм при сжигании ВКС ($W_{\text{ч}} = 65$ м/с) и ВКС + 16 % паров спирта ($W_{\text{ч}} = 90$ м/с). Отсюда вероятность получения покрытия в этом случае значительно меньше, чем при ламинарном течении продуктов горения, поскольку при дистанции напыления более 160 мм происходит захлаживание частицы.

Если используют порошок железа, то образование покрытия можно ожидать только при грануляции порошка 20... 40 мкм и турбулентном характере горения ВКС + 5,5 % паров бензина или ВКС + 16 % паров спирта. В этом случае максимальная скорость движения частиц порошка на границе рабочих зон не превышает 95 м/с при длине зоны рабочих температур 100... 110 мм. Дистанция напыления должна находиться в этих пределах, поскольку при большей дистанции напыления происходит захлаживание частиц. При малой дистанции напыления вероятность получения качественного покрытия значительно меньше, чем при напылении порошка меди.

При напылении порошка никелевого сплава ПГ-АН-33 длина рабочей зоны пламени больше по

сравнению с рабочей зоной при напылении порошка железа. Поэтому вероятность получения качественного покрытия в данном случае больше, чем при напылении порошка железа. Причем использование ламинарного характера течения продуктов горения рассмотренных горючих смесей, предпочтительнее, поскольку максимальная скорость напыляемых частиц на границе рабочей зоны больше, чем при турбулентном течении, и за пределами рабочей зоны частицы продолжают двигаться с ускорением, в связи с чем дистанция напыления составляет не менее 160... 190 мм.

Предположения о возможности использования для газопламенного напыления пламени, полученного при сжигании ВКС, вырабатываемой электролизно-водяным генератором, экспериментально проверены в процессе исследования качества покрытий, напыленных при оптимальных условиях горения пламени, выбранных на основании анализа вариантов из табл. 2.

Результаты изучения качества напыленных покрытий приведены в табл. 3. За критерий оценки качества покрытия взяты прочность сцепления покрытия с основой и пористость. Прочность покрытия с основой определяли клеевым методом (с использованием клея ЭПУ-ТЕХКО — 65 % и отвердителя 35 % с силой прижатия 50 кПа при нагреве до 70 °С). При этом отвердевание происходило в течение 5... 6 ч, толщина покрытия составляла 300 мкм ± 10 %. Напыление осуществляли на стандартные образцы, изготовленные из стали 45 диаметром 25 мм, после абразивно-струйной обра-



Таблица 2. Максимальные скорости движения частиц (м/с) на границе рабочей зоны факела и длина скоростных зон их движения

№ варианта	Состав продуктов горения	Характер течения струи	Грануляция порошка, мкм			Длина рабочей зоны $L_{з.р}$, мм	Длина скоростных зон движения частицы в газовом потоке, мм			Оптимальная дистанция напыления, мм
			20...40	20...63	63...100		$L_{з.р.ч}$	$L_{з.с.д}$	$L_{з.т.ч}^*$	
Порошок меди										
1	ВКС	Ламинарный	85	45	30	200	300	20	100	~ 200
2		Турбулентный	65	35	25	160	150	250	100	160
3	ВКС + пары бензина	Ламинарный	117	65	50	300	250	100	50	300
4		Турбулентный	100	55	45	180	200	200	50	180...200
5	ВКС + пары спирта	Ламинарный	115	62	50	300	300	20	100	~ 300
6		Турбулентный	90	45	35	160	150	250	100	150...160
Порошок железа ПЖ-1										
7	ВКС	Ламинарный	60	35	30	75	290	20	90	—
8		Турбулентный	70	38	30	95	100	275	90	—
9	ВКС + пары бензина	Ламинарный	90	60	50	105	250	100	50	≥ 105
10		Турбулентный	95	50	40	100	100	130	50	≥ 100
11	ВКС + пары спирта	Ламинарный	85	50	40	110	300	20	75	≥ 110
12		Турбулентный	95	55	45	110	100	275	75	≥ 100
Порошок никелевого сплава ПГ-АН-33										
13	ВКС	Ламинарный	80	45	35	160	290	20	80	≥ 160
14		Турбулентный	70	40	35	125	100	275	80	≥ 100
15	ВКС + пары бензина	Ламинарный	105	60	50	175	250	100	50	≥ 175
16		Турбулентный	100	55	45	150	110	150	90	≥ 150
17	ВКС + пары спирта	Ламинарный	100	55	45	190	300	10	90	≥ 190
18		Турбулентный	90	50	40	140	110	290	90	≥ 110

* $L_{з.т.ч}$ — длина зоны торможения движения частицы.

ботки. Испытание образцов проводили на машине TIRAtest 2151 со скоростью нагружения 2,5 мм/мин. Общую пористость покрытия измеряли методом гидростатического взвешивания [9]. Исследуемые образцы перед напылением нагревали до температуры 150 °С [10].

Максимальная прочность сцепления покрытия с основой составляла 28...30 МПа, она получена при напылении порошка меди грануляцией 20...40 мкм при ламинарном характере горения ВКС + 5,5 % паров бензина и ВКС + 16 % паров спирта при дистанции напыления 300 мм (табл. 2 и 3, варианты № 3 и 5). Общая пористость при этом составляла 3...4 %. С увеличением грануляции порошка меди на той же дистанции напыления прочность снижается соответственно до 20 и 22 МПа, а пористость увеличивается до 7...8 %.

Полученные результаты находятся на уровне прочности сцепления покрытия с основой и пористости при напылении цветных материалов с использованием ацетилено-кислородного пламени. По данным фирмы «Sulzer Metco», прочность сцепления покрытия с основой при напылении цветных порошковых материалов составляет 7...34 МПа, а пористость — 10...15 % [11].

Металлографический анализ структуры медного покрытия, напыленного порошком грануляцией 20...40 мкм (рис. 3, а) показал, что микроструктура частиц после напыления достаточно монолитная и оксидные включения практически отсутствуют. При напылении порошка грануляцией

63...100 мкм (рис. 3, б) наблюдается наличие оксидных включений, видны границы отдельных частиц, что объясняется их недостаточной энергией.

Исследование качества покрытия при напылении порошка железа ПЖ-1 грануляцией 20...40 мкм показало, что прочность сцепления покрытия с основой больше при турбулентном характере течения продуктов горения в случае использования смесей ВКС + 5,5 % паров бензина и ВКС + 16 % паров спирта.

При дистанции напыления 100 мм прочность покрытия с основой при сжигании смеси ВКС + 5,5 % паров бензина и турбулентном горении достигает 22 МПа, пористость покрытия — 5 %. При сжигании смеси ВКС + 16 % паров спирта и турбулентном характере течения продуктов горения с дистанцией напыления 110 мм прочность и пористость соответственно составляют 24 МПа и 4 %. Такие прочность сцепления покрытия с основой и пористость находятся на уровне анодических показателей качества при напылении металлических порошков на основе железа ацетилено-кислородным пламенем. По данным фирмы «Sulzer Metco» [11], прочность сцепления при напылении порошков черных металлов газопламенным напылением составляет 14...21 МПа, а пористость — 10...15 %.

Металлографический анализ покрытия показал, что при напылении порошка грануляцией 20...40 мкм имеет место достаточно плотная микроструктура покрытия, отличающаяся незначительным содер-



Таблица 3. Качество покрытий, напыленных с учетом оптимальных вариантов условий горения, в зависимости от состава и характера течения продуктов горения

№ варианта	Состав продуктов горения	Характер течения струи	Дистанция напыления, мм	Прочность сцепления покрытия с основой (МПа) при расходной грануляции порошка, мкм			Пористость покрытия (%) при расходной грануляции порошка, мкм		
				20...40	20...63	63...100	20...40	20...63	63...100
Порошок меди									
1	ВКС	Ламинарный	200*	22*	—	—	8	—	—
2		Турбулентный	160*	18*	—	—	12	—	—
3	ВКС + пары бензина	Ламинарный	300**	30**	26**	22**	3**	5**	7**
4		Турбулентный	180*	20*	16*	—	10*	12*	—
5	ВКС + пары спирта	Ламинарный	300**	28**	24**	20**	4**	6**	8**
6		Турбулентный	160*	20*	—	—	8*	—	—
Порошок железа ПЖ-1									
9	ВКС + пары бензина	Ламинарный	105*	22*	20*	14*	9*	12*	16*
10		Турбулентный	100**	24**	18**	—	7**	10**	—
11	ВКС + пары спирта	Ламинарный	110*	20*	16*	—	8*	14*	—
12		Турбулентный	110**	25**	18**	—	6**	10**	—
Порошок никелевого сплава ПГ-АН-33									
13	ВКС	Ламинарный	160*	8*	—	—	8*	—	—
14		Турбулентный	125*	6*	—	—	20*	—	—
15	ВКС + пары бензина	Ламинарный	175**	14**	12**	10**	8**	10**	12**
16		Турбулентный	150**	12**	—	—	10**	—	—
17	ВКС + пары спирта	Ламинарный	190**	15**	—	—	7**	—	—
18		Турбулентный	140*	10*	—	—	12*	—	—

Примечания. 1. Прочность сцепления и пористость покрытия порошка ПГ-АН-33 измеряли без оплавления после напыления.
2. Одна звездочка — напыление возможно, но качество невысокое; две — напыление возможно.

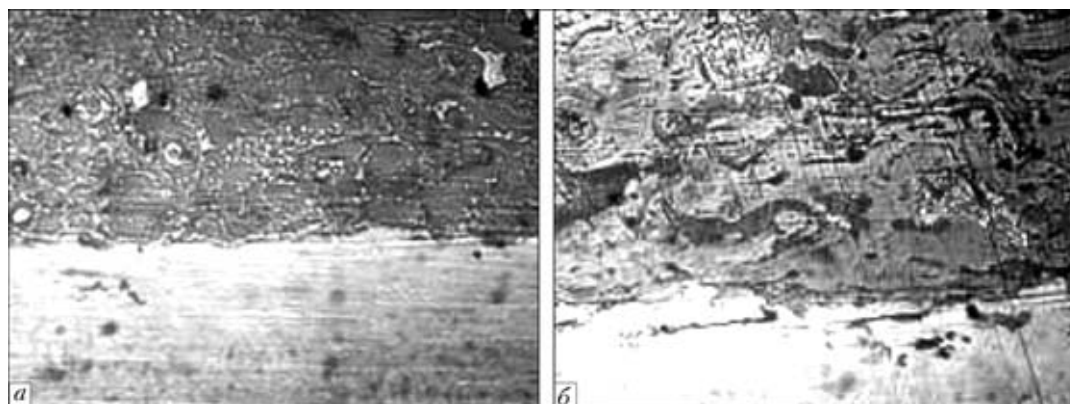


Рис. 3. Микроструктура (X300) покрытия, полученная напылением порошка меди грануляцией 20...40 (а) и 63...100 мкм (б) при ламинарном характере течения продуктов горения ВКС + 5,5 % паров бензина (дистанция напыления — 300 мм)

жанием оксидных включений с достаточной деформацией частиц, что свидетельствует о хорошем энергетическом состоянии частиц для образования покрытия (рис. 4). В микроструктуре покрытия, представленной на рис. 5, наблюдается присутствие оксидных включений на границе покрытие-основа и между слоями покрытия, наличие недеформированных и нерасплавленных частиц, а также имеет место ярко выраженная слоистость покрытия. Напыление порошка такой же грануляции даже при использовании пламени смеси ВКС + 5,5 % паров бензина не дает положительных результатов, что подтверждается наличием низкой прочности сцепления и высокой его пористостью.

Порошок на никелевой основе ПГ-АН-33 предназначен для напыления износостойких и корро-

зионностойких покрытий с последующим оплавлением. При газопламенном напылении ацетилено-кислородным пламенем прочность сцепления покрытия с основой составляет без оплавления 10... 20, а при оплавлении — 400... 450 МПа [12].

Напыление покрытия водородно-кислородным пламенем без оплавления с использованием порошка ПГ-АН-33 показало, что максимальная прочность сцепления находится на уровне покрытий, напыленных ацетилено-кислородным пламенем, и достигает 10... 15 МПа как при турбулентном, так и ламинарном характере течения продуктов горения газовых смесей.

При напылении порошка ПГ-АН-33 грануляцией 20... 40 мкм при ламинарном характере течения продуктов горения смеси ВКС с добавками

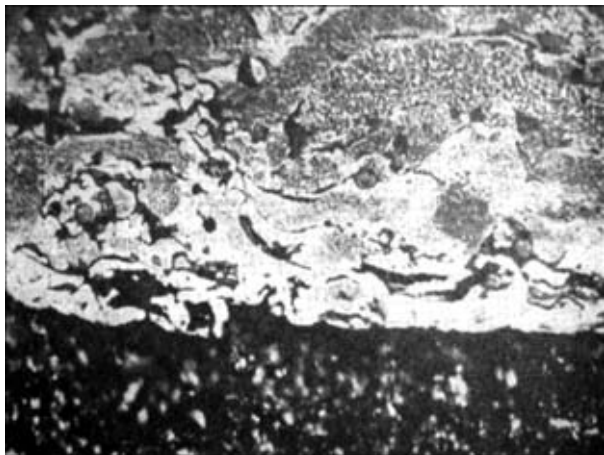


Рис. 4. Микроструктура (X300) покрытия, полученного напылением порошка железа ПЖ-1 грануляцией 20... 40 мкм при турбулентном характере течения продуктов горения смеси ВКС + 16 % паров спирта (дистанция напыления — 110 мм)

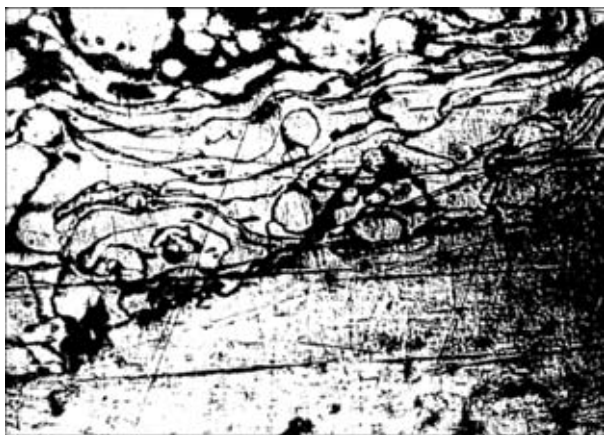


Рис. 5. Микроструктура (X300) покрытия, полученного напылением порошка ПЖ-1 грануляцией 63... 100 мкм при турбулентном характере течения продуктов горения ВКС + 5,5 % паров бензина (дистанция напыления — 100 мм)

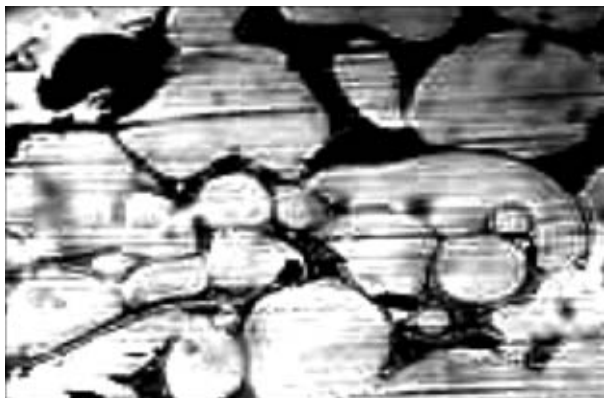


Рис. 6. Микроструктура (X300) покрытия, полученного напылением никелевым порошком ПГ-АН-33 грануляцией 63... 100 мкм при ламинарном характере течения продуктов горения смеси ВКС (дистанция напыления — 170 мм)

углеводородных соединений прочность сцепления покрытия с основой составляла 14... 15 МПа, что находится на уровне прочности покрытий, напыленных без оплавления при использовании ацетилено-кислородного пламени. Увеличение грануляции порошка снижает прочность сцепления

покрытия с основой. На рис. 6 хорошо видны не-расплавленные частицы порошка, что свидетельствует о недостаточном энергетическом состоянии частиц. Для получения качественного покрытия необходимо его оплавление.

Выводы

1. При газопламенном способе напыления с использованием водородно-кислородного пламени максимальная скорость, которую частица приобретает в газовом потоке при ламинарном характере течения продуктов горения, больше на 10 % по сравнению с турбулентным потоком. В случае добавления в горючую смесь паров бензина при ламинарном характере течения продуктов горения имеет место выраженная зона стабильного движения частиц. При этом максимальная скорость частиц больше, чем при использовании рассмотренных газовых смесей.

2. Водородно-кислородное пламя, полученное при сжигании смеси, производимой электролизно-водяными генераторами, можно применять для напыления материалов с температурой плавления ниже 1000 °С в случае ламинарного характера горения пламени при сжигании ВКС + 5,5 % паров бензина или ВКС + 16 % паров этилового спирта и дистанции напыления около 300 мм. Прочность сцепления покрытия с основой с увеличением грануляции порошка снижается. При газопламенном напылении медных порошков грануляцией 20... 40 мкм она составляет 28... 30 МПа, а в случае 63... 100 мкм снижается до 20... 22 МПа, пористость увеличивается соответственно с 3... 4 до 7... 8 %.

3. При напылении порошковых материалов грануляцией 20... 40 мкм с температурой плавления около 1500 °С возможно получение покрытия с прочностью сцепления не меньшей, чем при использовании ацетилено-кислородного пламени при турбулентном характере течения продуктов горения ВКС + 5,5 % паров бензина или ВКС + 16 % этилового спирта и дистанции напыления около 100... 110 мм.

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия // В. Н. Анциферов, Г. Б. Бобров, Л. К. Дружинин и др. — М.: Металлургия, 1987. — 792 с.
2. Харламов Ю. А. О роли скорости и температуры частиц при газотермическом напылении // Физ. и химия обработки материалов. — 1983. — № 3. — С. 12-17.
3. Дорожкин Н. Н., Абрамович Т. М., Сахнович В. Т. Теоретическая оценка времени нагрева частиц порошка при газотермическом нанесении покрытий // Докл. АН БССР. — 1989. — 33, № 1. — С. 44-47.
4. Применение газов-заменителей ацетилена при газопламенной обработке металлов // Под ред. И. А. Антонова. — М.: Машиностроение, 1964. — 150 с.
5. Корж В. Н., Попиль Ю. С. Влияние углеводородных добавок на структуру водородно-кислородного пламени и распределение температуры по длине факела // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 36-40.
6. Кудрявцев Е. В. Измерение температуры потока газа большой скорости при помощи термопар // Газодинамика и физ. горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 170 с.
7. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976. — 888 с.
8. Донской А. В., Клубицкий В. С. Электронплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1979. — 178 с.



9. *Кречмар Э.* Напыление металлов, керамики и пластмасс. — М.: Машиностроение, 1966. — 428 с.
10. *Исследование* остаточных напряжений в покрытии, основе и на границе их раздела / С. С. Макаревич, Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек и др. // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения. — Минск: Технопринт, 2001. — С. 326–332.
11. *Thermal coating processes* / Sulzer Metco. — Wastoury, 1996. — 20 p.
12. *Теория и практика* газопламенного напыления / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, Е. Д. Манойло и др. — Минск: Навука і тэхніка, 1993. — 295 с.

Influence of the combustible mixture composition and nature of its flow on the energy state of a spraying particle is considered. Conditions are established of producing flame-sprayed coatings of materials with different melting temperatures, using hydrogen-oxygen flame, formed when burning a mixture generated by water electrolysis generators.

Поступила в редакцию 14.12.2004,
в окончательном варианте 28.02.2005

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. (0612) 33 1058, 34 3623,
13 2269, (061) 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua



ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ СПИРАЛЬНОШОВНЫХ ТРУБ

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, **В. В. ПОЛУХИН**, канд. техн. наук, **Вл. В. ПОЛУХИН**, **Ю. В. ПОЛУХИН**, **А. С. ПРОКОФЬЕВ**, **В. Г. УДОВЕНКО**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности изготовления тонкостенных спиральношовных труб, их преимущества и области применения.

Ключевые слова: высокочастотная сварка, спиральношовные трубы, технология, оборудование, применение, изделия

С каждым днем экономия металла становится все более актуальной на фоне непрерывно растущих объемов его потребления и цены. Одним из примеров экономии металла является использование круглых тонкостенных труб и различных замкнутых тонкостенных профилей для создания всевозможных металлоконструкций и механизмов. Перспективным в этом направлении является использование тонкостенных спиральношовных труб, изготовленных с применением высокочастотной сварки [1–5], так как прямошовные или цельнотянутые трубы с малой толщиной стенки, отвечающие конструктивным требованиям, зачастую просто невозможно изготовить технологически. Кроме того, они несравненно дороже сварных труб, в том числе спиральношовных. Линии для производства спиральношовных труб с использованием ТВЧ позволяют производить особо тонкостенные трубы, у которых соотношение диаметра и толщины стенки может быть большим. На практике сегодня соотношение толщины стенки к диаметру в спиральношовной трубе составляет от 1:50 до 1:1200. Примером может служить труба диаметром 3200 мм с толщиной стенки 2,5 мм. По сути, это обечайки, которые на практике использовали в качестве наружной оболочки для изготовления легкопереносимых помещений при освоении труднодоступных районов. Наименьший диаметр спиральношовных труб, полученный в Институте электросварки им. Е. О. Патона, составляет 25 мм. Имеется опыт изготовления таких труб из специального немагнитного сплава, которые служат в качестве защитных корпусов микросхем.

ИЭС им. Е. О. Патона производит технологические линии для изготовления электросварных спиральношовных труб различного сортамента. Простота конструкции и обслуживания этих линий позволяет организовать изготовление труб в условиях неспециализированного трубного производства с возможностью легкой перенастройки их на изготовление труб различного диаметра и толщины стенки.

Возможности и преимущества тонкостенных спиральношовных труб. Для производства спи-

раальношовных труб с помощью токов высокой частоты применяются специальные установки. По сравнению с производством других видов труб, в том числе и электросварных прямошовных, производство спиральношовных труб имеет ряд преимуществ. Их производство более универсально и позволяет получать трубы различного диаметра из ленты одной ширины в очень широких диапазонах. На одной установке без всяких переналадок и замены элементов можно изготавливать трубы с различной толщиной стенки. Кроме того, из ленты различной ширины можно делать трубы одного типоразмера. Неточности по ширине в рулонах различных поставок легко компенсируются предусмотренными регулировками. Технологические линии для производства спиральношовных труб намного проще в обслуживании по сравнению с линиями для производства прямошовных труб.

Металлоемкость линий для производства спиральношовных труб меньше по сравнению с линиями для производства прямошовных труб примерно в 6...7 раз. Количество узлов, участвующих в формировке ленты в трубу, меньше примерно в 10 раз. Количество особо точных деталей, трудоемких в изготовлении, прежде всего формирующих валков, меньше примерно в 20 раз.

Протяженность линии для производства прямошовных труб диаметром 20...76 мм составляет около 50 м только в длину. Линия для производства спиральношовных труб помещается в цеху на площади 10×10 м. Благодаря несравненно меньшей металлоемкости их можно разместить на небольших производственных площадях, позволяя при этом легко вписывать их в существующие технологические процессы и не создавать дополнительные цеха, необходимые как для работы, так и для их обслуживания.

Все оборудование, на котором можно производить трубы диаметром до 1000 мм, вместе с источником питания можно разместить в автомобильном прицепе и прямо там изготавливать трубы (рис. 1). Не представляет труда расположить это оборудование и на других транспортных средствах — железнодорожных платформах, баржах и др., а также использовать в труднодоступных районах, производя на месте трубы, и экономя огромные средства на их транспортировке (фак-

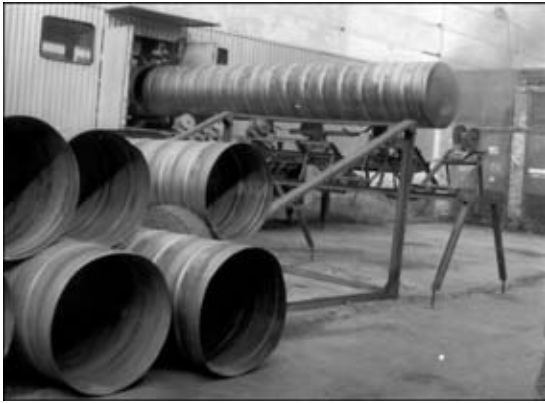


Рис. 1. Передвижной трубоизготовительный комплекс на базе полуприцепа длиной 13 м

тически на транспортировке воздуха) с трубосварочного завода.

Линии для изготовления спиральношовных труб позволяют сваривать трубы различного диаметра, толщины стенки и различных материалов. Линии обеспечивают непрерывную навивку ленты в трубу заданного диаметра с одновременным формированием сварного шва и автоматической порезкой на отрезки заданной длины. При этом не используются защитные газы, флюсы, присадочные материалы. Отсутствие флюсов и вредных испарений делает это производство совместимым с другими видами производств без изоляции друг от друга.

Кроме того, процесс производства спиральношовных труб является очень высокопроизводительным, полностью автоматизированным и весьма унифицированным, он исключает труд высококвалифицированных специалистов. Трубы, получаемые этим методом, могут использоваться в качестве трубопроводов для перемещения различных материалов и конструкционных элементов для всевозможных металлоконструкций.

Высокая точность спиральношовных труб является отличительной чертой их производства. Спиральношовные трубы, полученные способом высокочастотной сварки, характеризуются высокой точностью по диаметру в широком диапазоне типоразмеров. Точность изготовления их по диаметру находится в пределах 0,1 мм и выше (рис. 2).

Прочностные характеристики спиральношовных труб в большинстве случаев превосходят ха-



Рис. 2. Спиральношовные трубы диаметром 75×1,5 мм (а) и 152×1,5 мм (б) после токарной обработки

рактеристики труб, изготавливаемых по другим технологиям. Спиральношовные трубы в отличие от прямошовных обычно имеют более высокие прочностные характеристики и прямолинейность при изготовлении. Сварное соединение, выполненное высокочастотной сваркой, при изготовлении спиральношовных труб из малоуглеродистых сталей обычно имеет 100 % прочность по отношению к основному металлу.

Высокая прочность швов спиральношовных труб, применяемых в сосудах давления, объясняется тем, что спиральный шов практически располагается в направлении действия касательных напряжений, поэтому не работает на разрыв. Коэффициент запаса прочности спиральных швов по сравнению со швами, расположенными вдоль оси трубы, составляет 1,6...1,8 и зависит от ширины ленты, поэтому сосуды, изготовленные из спиральношовных труб, отличаются высокой прочностью. Высокая плотность металла шва обеспечивается соблюдением технологических параметров процесса сварки и формовки: перекрытия, нагрева, давления осадки. Соединение нагретых кромок при сварке сопровождается прокаткой. Термомеханическое упрочнение как неизбежная составляющая процесса высокочастотной сварки обеспечивает высокую прочность шва, которая обычно выше прочности основного металла.

Линии для производства спиральношовных труб (рис. 3) имеют следующие технические характеристики:

диаметр производимых труб, мм	75... 460
точность по диаметру, мм	0,1... 0,3
толщина стенки трубы, мм	0,5... 3
ширина применяемой ленты, мм	100... 200
скорость выхода трубы, м/мин	5... 30
потребляемая мощность, кВт	170... 220

Технологический процесс. Процесс изготовления спиральношовных труб начинается с разматывания ленты подающей машиной, расположен-

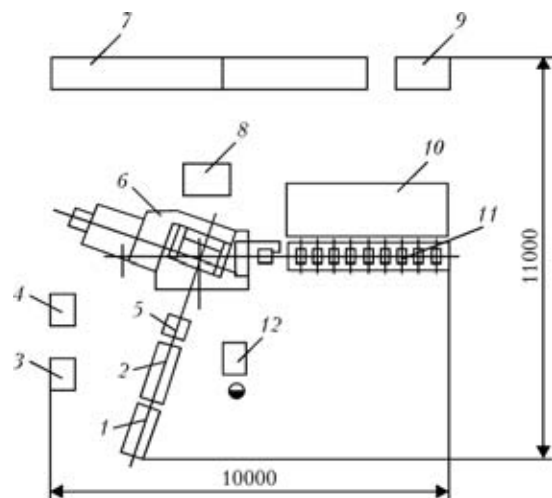


Рис. 3. Схема линии для производства спиральношовных труб: 1 – разматыватель; 2 – подающая машина; 3 – шкаф управления линии; 4 – шкаф управления плазморезки; 5 – стыковочное устройство; 6 – формовочно-сварочное устройство; 7 – генератор сварочный; 8 – сварочная головка; 9 – теплообменник; 10 – накопитель; 11 – приемный ролик с отрезным устройством; 12 – пульт управления

**Наиболее употребляемые типоразмеры диаметра и толщины стенки спиральношовных труб**

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Ширина ленты, мм
75...100	0,5...2,0	100
100...200	0,8...2,5	100
200...600	1,0...3,5	200
600 и выше	2,0...4,0	500 и выше

ной сразу за разматывателем. Далее располагается стыкосварочное устройство, используемое для стыковки рулонов во избежание перезаправки ленты в формовочно-сварочном устройстве и экономии на этом времени. Подающая машина, которая также при необходимости осуществляет рихтовку ленты, предназначена для плавной подачи ленты в формовочно-сварочное устройство и в основном применяется при использовании рулонов относительно большой массы и ленты толщиной более 2 мм или ее повышенной упругости.

Формовочно-сварочное устройство, являющееся основой в линии по изготовлению спиральношовных труб, выполняет функцию формовки ленты в трубу (рис. 4). Одновременно с формовкой происходит нагрев свариваемых кромок и их соединение. В зависимости от типа машины тем или иным способом осуществляется автоматическое поддержание заданного диаметра трубы.

Далее осуществляется автоматическая порезка свариваемой трубы на мерные отрезки без остановки процесса специальным следящим устройством, синхронизирующим скорость выхода трубы и скорость перемещения режущего механизма. Для резки в линии можно использовать различное оборудование. Одним из возможных вариантов является применение плазменной резки, что не исключает применение другого оборудования и способов, например, отрезных кругов различной конструкции и т. д. (рис. 5).

Для изготовления спиральношовных труб применяют установки двух типов, отличающиеся принципом поддержания заданного диаметра формуемой трубы, а именно:

тип «а» — оснащенный формующим элементом типа «улитка». Эти установки в основном применяются для изготовления труб диаметром до 400 мм;

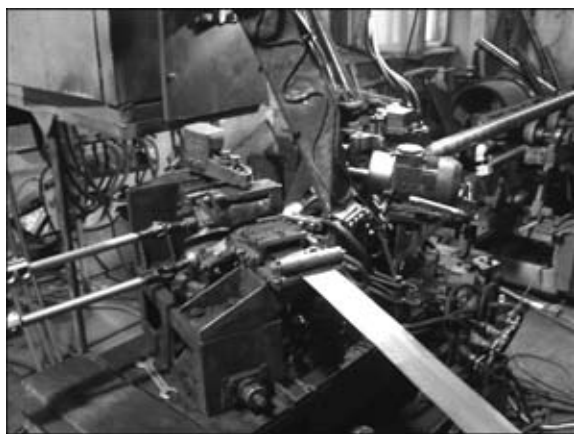


Рис. 4. Формовочно-сварочное устройство для производства спиральношовных труб

тип «б» — неоснащенный формующим элементом, но с устройством автоматического поддержания заданного диаметра в зоне формовки. Эти установки, применяемые для изготовления труб диаметром более 400 мм, несколько сложнее, но позволяют получать трубы неограниченно большого диаметра и при этом обеспечивают высокую чистоту поверхности трубы и соблюдения ее формы.

Кроме основных типов установок, изготавливаемых в ИЭС им. Е. О. Патона, выпускаются также установки по индивидуальным заказам, которые учитывают требования заказчика к качеству и типоразмеру трубы. Все установки практически обслуживают один оператор.

Номенклатура производимых спиральношовных труб. Толщина стенки спиральношовных труб, наиболее часто применяемых в машиностроении, обычно составляет от 0,5 до 2,5 мм. Наиболее востребованными являются трубы диаметром от 76 до 250 мм с толщиной стенки от 1 до 2 мм. В большинстве случаев при этом используется лента шириной 100 и 200 мм. При изготовлении труб диаметром более 400 мм целесообразно применение ленты шириной 500 или 700 мм.

Соотношения толщины стенки и диаметра спиральношовных труб могут изменяться в широком диапазоне (таблица).

Основной способ сварки, используемый при изготовлении труб из малоуглеродистой стали, — это высокочастотная сварка, возможно применение и аргонодуговой сварки. Другие способы соединения можно применять, если не требуется высокая производительность. Источники питания дуговых аппаратов намного дешевле, меньше по размерам, хотя не проще в эксплуатации. Дуговые способы сварки более применимы для изготовления труб из специальных сталей и алюминиевых сплавов или там, где нет необходимости в производстве больших объемов труб.

Применение спиральношовных труб. Тонкостенные спиральношовные трубы нашли широкое применение в различных отраслях благодаря простоте их изготовления и широкого спектра типоразмеров.

Вентиляционные системы. Возможность изготовления труб из ленты малой толщины с одновременной накаткой спирального гофра создает до-



Рис. 5. Отрезной механизм в работе

полнительные возможности экономии металла (за счет снижения толщины) благодаря увеличению жесткости трубы. Это в свою очередь позволяет изготавливать отсасывающую вентиляцию из металла гораздо меньшей толщины, чем было принято ранее, и не применять для этих целей дорогие толстостенные трубы. Например, толщину стенки отсасывающей вентиляционной трубы диаметром 820 мм можно снизить до 2 мм. Большое количество металла экономится за счет отсутствия закатного шва, как принято делать по технологии «Nokia». Применение телескопического соединения труб, благодаря высокой точности их геометрии, позволило отказаться от традиционной сборки воздуховодов с применением фланцев (рис. 6), а применение оцинкованной и алюминированной ленты для этих труб дает хорошую защиту от коррозии. При этом коррозионные свойства шва остаются на уровне основного металла (рис. 7).

Тара, бочки. Особо тонкостенные спиральношовные трубы нашли применение при изготовлении тары для лакокрасочной и химической промышленности. Из обечаек диаметром 300 мм изготавливают бочки для краски, а трубы диаметром 560 мм используют для производства бочек емкостью 200 л для хранения и перевозки горючесмазочных материалов.

Опоры. Из тонкостенных спиральношовных труб были изготовлены железобетонные опоры (колонны). Испытания показали, что прирост прочности таких колонн на 100 % превышал расчетный.

Крепежные столбы для шахт также могут изготавливаться из спиральношовных труб. Испытания на сжатие показали, что спиральношовная труба оказывается прочнее цельнотянутой или сварной прямошовной. Это объясняется склонностью спиральношовной трубы во время сжатия скручиваться, на что затрачивается дополнительная работа.

В ряде регионов дорожные знаки устанавливают на столбах из спиральношовных труб.

Системы орошения. Использование спиральношовных труб в системах орошения в несколько раз снизило металлоемкость последних. При этом сроки службы этих систем не снижаются, так как для изготовления трубопроводов может применяться оцинкованная или алюминированная лента.

Теплотрассы, трубопроводы. Перспективно применение тонкостенных спиральношовных труб для теплотрасс и водопроводов. Подсчитано, что применение эмалированных тонкостенных труб

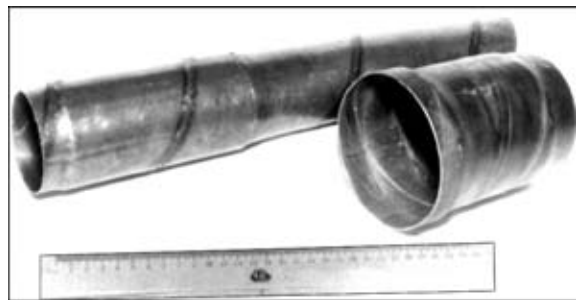


Рис. 6. Спиральношовные трубы, изготовленные с раздочей диаметра в концевой части

экономически значительно выгоднее, чем укладка толстостенных изолированных труб с учетом их возможной коррозии. Особо тонкостенные спиральношовные трубы здесь же могут применяться для защиты (оболочки) теплотрасс. Из труб, с накатанным во время изготовления гофром, можно делать термокомпенсаторы.

В сельскохозяйственном машиностроении тонкостенные спиральношовные трубы в первую очередь нашли применение в качестве корпусов шнеков зерноуборочных комбайнов (Херсонский завод сельхозмашиностроения). В мукомольной промышленности — это мукопроводы и зернопроводы.

Емкости, ресиверы, баллоны, огнетушители. Корпуса некоторых видов огнетушителей изготавливают из спиральношовных труб. Огромная потребность в них обуславливает высокую эффективность такого производства.

Многослойные сосуды высокого давления выдерживают нагрузку большую, чем однослойные из толстого металла той же толщины, что и суммарная толщина многослойных сосудов. Поэтому особый интерес могут представлять многослойные емкости высокого давления, изготовленные из набора спиральношовных труб. Возможность изготовления спиральношовных труб высокой точности позволяет собирать (вставлять друг в друга) отдельно сваренные трубы с термическим натягом и со смещением швов. Внутреннюю часть такого многослойного сосуда можно делать из коррозионностойкой стали и применять такие сосуды для хранения и транспортировки агрессивных веществ, экономя на дорогих нержавеющей сталях.

Полотнища и оболочки. Спиральношовные трубы могут использоваться для изготовления различных полотнищ и оболочек с последующим их профилированием или без него. Например, спиральношовные трубы диаметром 3200 мм и длиной 10 м являлись оболочками круглых домов (ЦУБов), предназначенных для освоения труднодоступных районов. Если такую трубу разрезать вдоль, получается металлическое полотнище площадью 100 м².

Балки, профили, фермы. Новое в применении тонкостенных спиральношовных труб — это из-



Рис. 7. Спиральношовные трубы, изготовленные из оцинкованной и алюминированной стали

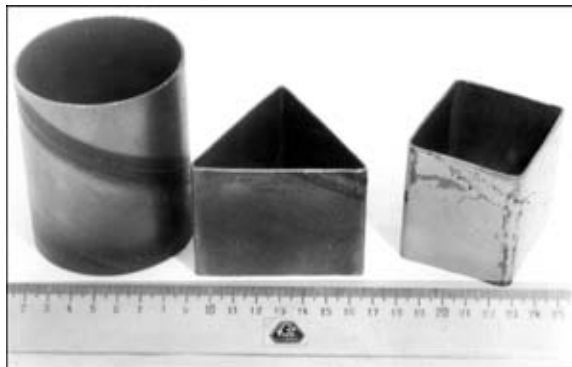


Рис. 8. Перепрофилированные спиральношовные трубы

готовление из них различных профилей, являющихся как элементами металлоконструкций, так и элементами различных балок или ферм. Спрофилированная в треугольник, квадрат, прямоугольник или другую форму труба будет иметь повышенную жесткость в нужном направлении (рис. 8). Из таких труб можно делать оконные и дверные рамы. Необходимо также учесть, что профили, изготовленные из труб, будут иметь замкнутое сечение, что повышает их жесткость и устойчивость к коррозии. Различные варианты сопряжения предварительно спрофилированных труб (рис. 9), дают новые возможности для проектирования и использования их в металлоконструкциях. Особенно это эффективно в сочетании с антикоррозионной металлизацией конструкции, что в комплексе даст возможность осуществлять их полную сборку в заводских условиях. Низкий удельный вес таких конструкций удешевит их доставку в труднодоступные районы.

Сегодня в селе спиральношовные трубы используются в качестве различных трубопроводов, тары, емкостей, элементов машиностроения, элементов

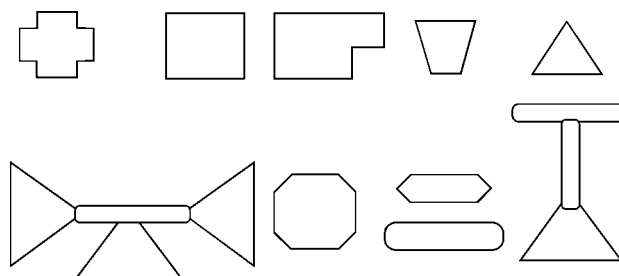


Рис. 9. Схематическое изображение балок и профилей, полученных путем перепрофилирования круглой трубы и их сочетания

строительных конструкций (как самостоятельных балок, так и составных частей ферм). Установки для изготовления этих труб являются универсальным оборудованием, так как могут производить трубы различного сортамента.

Для получения более подробной информации просьба обращаться по адресу: Украина, 252650, Киев-5, ГСП, ул. Боженко 11, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отдел 43 «Электротермии». Тел./факс: (044) 289-10-89; (044) 220-10-89; (044) 287-42-20. E-mail: pismenny@paton.kiev.ua.

1. Шапов А. Н., Лукин И. В., Иванов В. Н. Высокочастотная сварка металлов. — Л.: Политехника, 1991. — 240 с.
2. Pismenny A. S. High-frequency welding of metals. — Amsterdam: Harwood Acad. publ., 1997. — 150 p.
3. Высокочастотная сварка спиральношовных труб со стыковым соединением кромок / Ю. Н. Скачко, В. Ф. Мошкин, Р. И. Гаркалюк и др. // Автомат. сварка. — 1970. — № 1. — С. 63-65.
4. Скачко Ю. Н., Мошкин В. Ф., Попов Н. В. Высокочастотная сварка спиральношовных труб с косым стыком // Там же. — 1972. — № 7. — С. 70, 71.
5. Анализ сближения кромок при формовке и высокочастотной стыковой сварке спиральношовных труб / Ю. Н. Скачко, Н. В. Попов, В. Ф. Мошкин, Ю. Д. Кручинин // Там же. — 1975. — № 6. — С. 30-32.

Features of manufacturing thin-walled spirally-welded pipes, their advantages and applications are considered.

Поступила в редакцию 23.03.2005

ЭЛЕКТРОДЫ ЭПС-АН1 ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ

Предназначены для сварки под водой на глубине до 20 м металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести до 350 МПа во всех пространственных положениях. Обеспечивают получение механических свойств на уровне (не менее): $\sigma_T = 330$ МПа, $\sigma_B = 420$ МПа, $\delta = 12\%$, $KCV_{-20} = 25$ Дж/см². Соответствуют требованиям класса В Классификации по подводной сварке ANSI/AWS D3.6.

Область применения. Ремонт судов на плаву, трубопроводов, портовых сооружений, заварка свищей и трещин на трубах тепломагистралей без слива горячей воды и т. п.

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

ТЕХНОЛОГИЯ МОКРОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЛСП «ПРИРАЗЛОМНАЯ»

В. Я. КОНОНЕНКО, канд. техн. наук, директор ДП «Экотехнология» (г. Киев)

Рассмотрены особенности применения технологии мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при монтаже суперблоков МЛСП «Приразломная».

Ключевые слова: мокрая механизированная сварка, самозащитные порошковые проволоки, сварка в сухом кессоне, морская платформа

Закладка морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная», которую строит Северодвинское ФГУП «ПО «Севмашпредприятие» (заказчик — ЗАО «Росшельф»), состоялась в декабре 1995 г.

13 июля 2002 г. «Севморнефтегаз» и ПО «Севмашпредприятие» заключили договор на изготовление опорного основания платформы. Для удешевления и ускорения строительства «Приразломной» было принято решение нижнюю часть платформы (около 30 % стоимости проекта) построить совместно с российским предприятием, а верхнюю (жилой, буровой комплексы, технологические модули) срезать с выведенной из эксплуатации иностранной платформы. В августе 2003 г. верхняя часть платформы была доставлена в акваторию ПО «Севмашпредприятие». Одновременно с ее приобретением на предприятии изготавливали кессон, представляющий собой сварную конструкцию из хладостойких сталей размерами 126×126×24,3 м и массой около 70 тыс. т, обеспечивающий хранение 700 тыс. баррелей нефти и отгрузку ее на танкеры. На эту конструкцию и установят модернизированную верхнюю часть платформы. Собрать кессон таких размеров на стапелях завода ПО «Севмашпредприятие» сегодня невозможно. Поэтому было принято решение кессон разделить на четыре суперблока, каждый из которых размером 126×31,5×24,2 м. 27 февраля 2004 г. изготовлен второй суперблок кессона (рис. 1) плат-



Рис. 1. Суперблок № 2 и 3 в наливном бассейне

формы «Приразломная», а 28 мая — третий. В наливном бассейне ПО «Севмашпредприятие» сегодня находятся уже три из четырех суперблоков кессона. В 2004 г. фирма ООО «СВП «Интер-Аква», зарегистрированная в России, приступила к реализации проекта по сборке суперблоков [1]. Собрать такую конструкцию на стапелях завода ПО «Севмашпредприятие» сегодня не представляется возможным. Для соединения суперблоков применена известная за рубежом технология (до настоящего времени не применяемая на территории стран СНГ) поэтапной сборки с использованием сухого кессона — устройства для герметизации стыка (УГС). Она заключается в том, что на стапеле при изготовлении каждой секции в ее нижней части монтируется половина удаляемого впоследствии УГС (рис. 2). Соединение двух половинок УГС, изготовленных из стали РСА ГОСТ 5521–93, осуществляется под водой на глубине 8 м с использованием технологии мокрой механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой. Сварка осуществляется под надзором Российского Морского Регистра судоходства. К работе были допущены водолазы-сварщики, имеющие квалификацию не ниже 2 класса I-II группы специализации, прошедшие соответствующую подготовку и сдавшие практические экзамены по сварке в вертикальном и потолочном положениях во ФГУП «ПО «Севмашпредприятие».

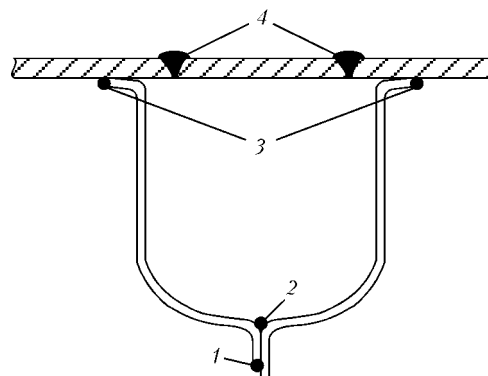


Рис. 2. Принципиальная схема УГС: 1 — трехслойный шов, формируемый под водой с применением механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой; 2 — дополнительный шов, выполняемый после осушения УГС электродами УОНИИ-13/45Р; 3 — монтажный угловой шов, выполненный на стапеле при подготовке УГС; 4 — многопроходный стыковой шов, выполняемый в сухих условиях при соединении донной и бортовой части суперблоков кессона



Разработанные ранее в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины порошковые проволоки марок ППС-АН1, ППС-АН2 и ППС-АН5 не обеспечивают необходимого прогнозируемого уровня качества соединения при сварке под водой швов в потолочном положении. В связи с этим для выполнения работ по созданию опорной части основания применили порошковую проволоку ППС-ЭК1, разработанную фирмой «Экотехнология» (ТУ 14288312.003-97) [2]. После полутора лет работы разработана и согласована соответствующая техническая и технологическая документация, выпущены и испытаны образцы порошковых проволок, проведена подготовка водолазов-сварщиков. Все консультативные услуги в рамках этого проекта, разработка и поставка порошковых проволок, а также обучение специалистов проведено сотрудниками фирмы «Экотехнология».

Работа по соединению двух частей УГС включает сварку в потолочном (126 м) и вертикальном (16 м на секцию) положениях. Все работы выполняются в мокром обогреваемом водолазном снаряжении (температура воды не превышала 4 °С). Подача воздуха для дыхания и горячей воды для отопления снаряжения осуществляется по шланговой связке. При выполнении работ водолазу приходится уходить от места спуска на расстояние до 70 м, транспортируя к рабочей беседке полуавтомат и зачистную машинку. Определенные проблемы возникают из-за большой длины сварочной цепи (200 м). Дополнительное активное сопротивление в сварочном контуре снижает стабильность дугового процесса и повышает чувствительность к возмущениям, связанным с неравномерной подачей в зону сварки порошковой проволоки при волнении [3]. Уменьшить длину сварочной цепи не представляется возможным из-за взаимного расположения суперблоков и обслуживающих судов.

Для выполнения работ используются полуавтоматы для подводной сварки А1660 и ПСП-3



Рис. 3. УГС после осушения

(выпускается в настоящее время в России взамен А1660). Конструкция погружного узла полуавтомата А1660 доработана и обеспечена его нулевая плавучесть (масса стандартного погружного узла полуавтомата под водой более 35 кг вместе с запасом проволоки). Нулевую плавучесть за счет поплавков имеет и сварочный кабель сечением 70 мм², увязанный в общую связку с кабелем цепи управления. В качестве источника питания дуги применяется выпрямитель ВС 300. Зачистка швов под водой осуществляется с помощью гидродинамического инструмента МНС-30, ДП-16 металлическими щетками и абразивными кругами толщиной 3...6 мм.

Технология выполнения работ включает следующие этапы:

зачистку наружной поверхности свариваемых элементов;

установку струбцин и обжатие свариваемых деталей УГС на всю длину конструкции;

прихватку деталей УГС (шов длиной не менее 100 мм) через каждые 200...300 мм;

зачистку прихваток и их визуальный контроль; демонтаж струбцин и 100%-й контроль качества сборки с помощью подводного видео-, телекомплекса с записью на видеоносителях;

сварку корневого шва с зачисткой от шлака и 100%-й контроль качества сварки внешним осмотром на предмет отсутствия недопустимых наружных дефектов с помощью подводного видео-, телекомплекса с записью результатов на видеоносителях;

сварку второго и третьего слоя с зачисткой и 100%-й контроль качества сварки внешним осмотром всего соединения в целом на предмет отсутствия недопустимых наружных дефектов с помощью подводного видео-, телекомплекса с записью результатов на видеоносителях.

Ежедневно перед началом выполнения сварочных работ сварщик осуществляет сварку пробного образца длиной не менее 100 мм. При этом подтверждается правильность настройки режима и оценивается качество формирования металла шва. Раз в неделю сваренные пробы проходят механические испытания на излом по ГОСТ 6996-66. В случае обнаружения дефектов производится их исправление в соответствии с РД 5.1078-76 (Корпусные конструкции металлических судов. Исправление дефектных участков сварных соединений. Основные положения.). Местоположение исправленных дефектов фиксируется в журнале.

В ноябре-декабре 2004 г. осуществлена сборка и сварка УГС между вторым и третьим суперблоками (секциями) (рис. 3). Сварку под водой в вертикальном и потолочном (рис. 4) положениях производили на следующем режиме: $I_{св} = 110...180$ А; $U_{д} = 24...29$ В. Потери напряжения в сварочном контуре за счет активного сопротивления не превышали 9 В. Скорость сварки трехпроходного шва в потолочном положении (без учета подготовительно-заключительного времени) составила 8,3 (корневого); 6,8 (второго); 6,25 (третьего шва) м/ч.

Механические свойства металла шва, полученные при использовании партии порошковой про-

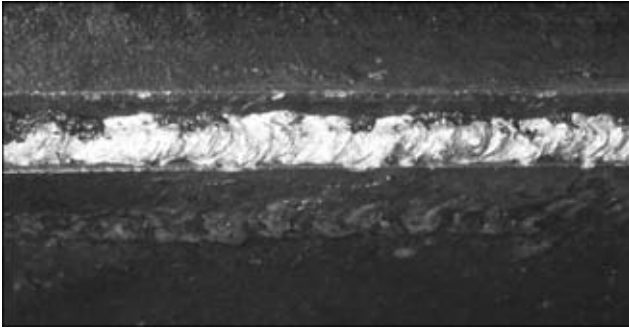


Рис. 4. Внешний вид трехслойного шва, выполненного под водой в потолочном положении

волокни ППС-ЭК1, поставленной для выполнения работы, следующие:

$$\sigma_b = 461,2(448,8... 480,2) \text{ МПа};$$

$$\sigma_t = 373,1(371,3... 375,8) \text{ МПа};$$

$$KCV \text{ при } 20^\circ\text{C} = 75,5 (70,4... 77,7) \text{ Дж/см}^2.$$

Относительное удлинение и относительное сужение не регламентировались.

Массовая доля элементов в наплавленном металле (шестой слой) составила, %: 0,015 С; 0,04 Si; 0,12 Mn; 1,14 Ni; 0,026 S; 0,016 P.

Сварка контрольных стыковых образцов из стали ВСтЗсп толщиной 14 мм и шестислойная наплавка выполнена автором в пресной воде на глубине около 5 м.

Боковые части кессона соединены двухпроходным угловым швом в вертикальном положении, средняя скорость сварки составляла 4 м/ч. Ос-

Information is given on application of the technology of wet mechanized welding with self-shielded flux-cored wires in mounting of superblocks of Prirazlomnaya MLCP.

новные проблемы при сварке возникали при формировании швов в зоне переменного смачивания.

После выполнения подводных швов и проверки их на герметичность кессон был осушен и выполнена сварка с внутренней стороны «в сухих» условиях электродами УОНИИ-13/45Р. Затем специалисты ПО «Севмашпредприятие» приступили к сварке секций суперблоков с использованием стандартных технологий, принятых на предприятии. Толщина соединяемого металла на днище и бортах составляла 32 мм. Сварка второго и третьего суперблоков осуществлена в марте 2005 г. После выполнения сварочных работ и контроля качества полученного соединения УГС (сухой кессон) между вторым и третьим суперблоками был удален с использованием технологии подводной резки экзотермическими электродами.

Соединение первого и второго суперблоков кессона платформы «Приразломная» с применением описанной выше технологии было намечено на июнь, а третьего и четвертого — на август 2005 г. В 2005 г. платформу «Приразломная» планируют отбуксировать к месту установки.

1. Кононенко В. Я. Технологии подводной сварки и резки. — Киев: Экотехнология, 2004. — 135 с.
2. Кононенко В. Я. Современное состояние подводной сварки и резки // Свароч. пр-во. — 1999. — № 5. — С. 37–40.
3. Анализ возможности отработки системой саморегулирования характерных возмущений по длине дуги при подводной механизированной сварке / В. К. Лебедев, Ю. А. Узиловский, И. М. Савич, В. Я. Кононенко / Под ред. А. Е. Асниса. Подводная сварка и резка металлов. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1980. — С. 10–23.

Поступила в редакцию 24.02.2005

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ А-TIG СТАЛЕЙ БЕЗ РАЗДЕЛКИ КРОМОК С ВОЗМОЖНЫМ ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ АВТООПРЕССОВКИ

Предлагаемая технология аргодуговой сварки неплавящимся электродом с применением активирующих флюсов позволяет получать сварные соединения прямолинейных и кольцевых стыков труб со свободным формированием при толщине свариваемых кромок до 10 мм без их разделки. Она обеспечивает повышение производительности сварочных работ и высокое качество соединений сталей по показателям прочности, пластичности и вязкости.

Действие активирующего флюса, вводимого в зону сварки, заключается в сжатии дуги, увеличении концентрации нагрева и давления дуги на сварочную ванну, увеличении в 2,5 раза проплавливающей способности дуги и уменьшении ширины шва по сравнению с традиционной сваркой TIG на том же токе.

Технология успешно устраняет недостатки формирования ранее выполненного шва без разделки его дефектного участка.

Одним из способов получения усиления шва при сварке А-TIG является применение специальной автоопрессовки без использования присадочной проволоки.

Предложения по сотрудничеству. *На контрактной основе разработка технологии сварки и активирующих флюсов в зависимости от применяемой стали и конструкции сварного изделия; поставка активирующего флюса; оказание технической помощи при освоении технологии изготовления и ремонта отдельных изделий и опытно-промышленных партий сварных изделий.*

Контакты: 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 11

Тел./факс: (38044) 289 17 39

E-mail: savitsky@paton.ua



СВАРКА ТРУБ С ТРУБНЫМИ РЕШЕТКАМИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В. Е. БЛАЩУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Г. М. ШЕЛЕНКОВ, канд. техн. наук, **В. Э. ТРОЯНОВСКИЙ**, инж.
(ОАО «Сумское машиностроительное НПО им. М. В. Фрунзе»)

Приведены результаты работ по разработке технологии и оборудования соединения труб с трубными решетками. Описаны основные технологические операции, позволяющие получать качественные сварные соединения.

Ключевые слова: аргодуговая сварка, электроно-лучевая сварка, титановые сплавы, теплообменники, трубные решетки, трубы, селективная сборка, вальцовка

Неотъемлемыми элементами теплосиловых установок являются теплообменные аппараты, которые широко используются во многих отраслях промышленности, в том числе атомной энергетике. В последнее время в этой отрасли все большее применение находят теплообменные аппараты, изготавливаемые из титановых сплавов. К их герметичности предъявляются особо жесткие требования, вытекающие из условий безопасной эксплуатации. Это в свою очередь обуславливает высокие требования к качеству соединений труба-трубная решетка, гарантирующие не только надежную герметичность соединений, но и выполнение жестких требований к основным геометрическим размерам теплообменника (уменьшение проходного сечения труб, отклонение от плоскости трубной решетки и др.) [1].

При изготовлении трубчатых теплообменников из титановых сплавов в основном используются два варианта крепления труб в трубной решетке: сварка и сварка + вальцовка [2]. Первый вариант, как правило, применяется при изготовлении теплообменников, эксплуатируемых в стационарных условиях и под воздействием агрессивных сред, второй — при эксплуатации в условиях воздействия вибрационных нагрузок и высоких давлений.

Сварка труб с трубными решетками по отношению к трубной решетке выполняется в двух положениях — в нижнем и на вертикальной плоскости. В цеховых условиях сварку в нижнем положении выполняют в технологических шахтах или на высотных спецплощадках. При отсутствии технологических приспособлений или нецелесообразности их применения из-за габаритных размеров изделия сварку производят в вертикальной плоскости, располагая изделие на роликоопорах. В этом случае при автоматической сварке труб с трубной решеткой возникают определенные трудности, связанные с изменением геометрических параметров сварочной ванны, которые зависят от пространственного положения дуги при ее перемещении по периметру торца трубы. При ручной сварке такие швы выполняют с помощью соот-

ветствующих манипуляций электродом и изменения скорости сварки [3–5].

Важной задачей при разработке технологии сварки труб с трубными решетками является получение заданной высоты рабочего сечения шва для обеспечения максимального проходного сечения трубы (рис. 1). Для теплообменников общего назначения высота рабочего сечения шва $h \geq 0,5b$ (b — толщина стенки трубы). Для теплообменников, к которым предъявляются жесткие требования по надежности закрепления труб, $h \geq b$. Наибольшая надежность достигается при соотношении глубины проплавления к толщине стенки трубы $h/b = 3:4$. Особое внимание в процессе сборки труб с трубными решетками уделяется обеспечению требуемой величины зазора между свариваемыми деталями, что достигается путем либо селективной сборки, либо механической подвальцовки концов труб.

При подготовке деталей к сборке и в процессе сборки под сварку принимают меры для обеспечения надлежащей чистоты поверхностей собираемых деталей. С этой целью концы труб перед набивкой в трубные решетки подвергают механической зачистке и обезжириванию. Аналогично подготавливают отверстия в трубных решетках. Оценка качества подготовки определяют путем протирки поверхностей деталей отбеленной бязевой салфеткой, следы загрязнений на которой не до-

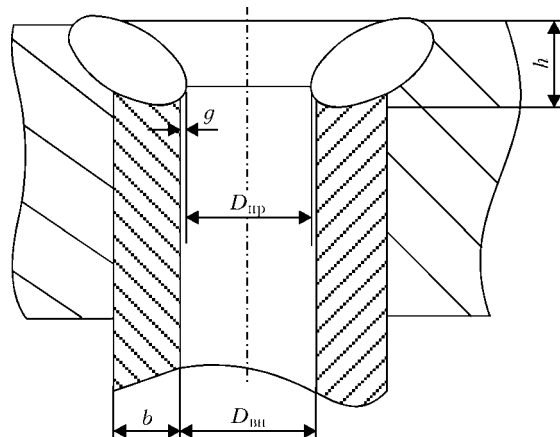


Рис. 1. Схема сварного соединения труба-трубная решетка: h — высота рабочего сечения шва; g — величина наплыва шва; b — толщина стенки трубы; $D_{вн}$ — внутренний диаметр трубы; $D_{пр}$ — диаметр проходного сечения трубы

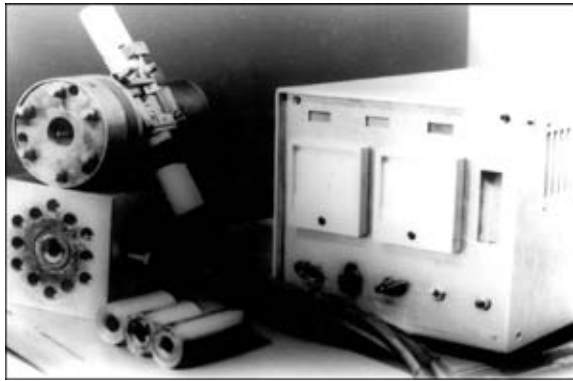


Рис. 2. Сварочный автомат «Комета-М» для сварки труб с трубными решетками погруженной дугой

пускаются. В противном случае операции обезжиривания и последующего контроля повторяют. При сборке под сварку зазор между трубой и стенкой отверстия в трубной решетке не должен превышать $0,1... 0,2$ мм. Превышение допустимого зазора приводит к нарушению формы шва, прожогам стенки трубы и другим дефектам. Однако в тех случаях, когда рабочая среда может вызвать развитие щелевой коррозии, зазоры в обязательном порядке подлежат удалению путем развальцовки (запрессовки) труб на всю толщину трубной решетки до или после операции сварки, либо соединения труба–трубная решетка выполняют с увеличенными зазорами.

В процессе обварки труб в трубных решетках для обеспечения защиты корня сварного шва и прилегающих к нему нагретых участков собираемых деталей от контакта с воздухом межтрубную полость аппарата заполняют аргоном. Сварку выполняют при минимальном разогреве трубной решетки (ее температура в зоне расположения соседних трубок со свариваемой не должна превышать $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При единичном производстве обварку труб в трубных решетках теплообменных аппаратов производят ручной аргонодуговой сваркой. К недостаткам данного способа следует отнести низкую производительность, малую и нестабильную глубину проплавления, высокую пористость швов (особенно при сварке по предварительно развальцованным трубам), зависимость качества сварки от индивидуального мастерства сварщика. Частично такие недостатки устраняют путем применения флюсовых реагентов на основе фторидов щелочных металлов типа БМК-1, однако при этом ухудшается товарный вид сварных швов, возникают трудности с обнаружением дефектов при испытании на плотность, а сам процесс идет с выделением вредных веществ и требует применения дополнительных средств защиты зоны дыхания сварщика [6].

Для получения гарантированного показателя $h/b > 2$ в сварных соединениях труба–трубная решетка можно использовать известную технологию электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в местном вакууме. Для этого разработаны сварочные пистолеты, пространственно ориентирующие электронную пушку на сварку кольцевых швов с помощью центраторов и уплотнителей. Путем двойного лучепреломления



Рис. 3. Сварочный автомат «Агат-1М» для импульсной сварки труб с трубными решетками с принудительным формированием шва

пучок выводится на стык с погрешностью $\pm 0,2$ мм. Однако из-за невозможности устранения корневых дефектов в швах, свойственных ЭЛС, такая технология широкого распространения не нашла [7].

Для получения сварных соединений требуемого качества с показателем $h/b \geq 1$ в ОАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» применена технология сварки труб в трубные решетки погруженной дугой, для чего разработана и изготовлена партия автоматов «Комета» (рис. 2), оснащенных системой автоматического регулирования напряжения дуги (АРНД). Технология сварки по слою флюсового реагента с применением этих автоматов обеспечила требуемую глубину проплавления при высокой производительности процесса, однако недостатки, присущие данной технологии, остались прежние. Поэтому необходимо было выполнить работы по совершенствованию технологии и разработать новое оборудование для автоматической сварки труб с трубными решетками, исключая применение флюсового реагента и позволяющее получать сварные соединения, отвечающие требованиям нормативной документации. При этом оказалось, что автоматы «Комета» не полностью обеспечивают решение поставленной задачи.

Анализ выпускаемых автоматов для сварки титановых труб с трубными решетками показал, что сварочная головка серии «АГ», входящая в состав серийно выпускаемого автомата «Агат-1» (конструкции ЦНИИТМАШ), имеет ряд преимуществ по сравнению с серийными импортными головками аналогичного класса, что предопределило ее выбор в качестве базовой для модернизации автомата. Последнему присвоена марка «Агат-1М» (рис. 3). Доработку автомата производили в части возмож-



ности его работы с более мощными источниками питания типа ВСВУ-315, а позже — «ТТ-3000» фирмы «Fronius» (Австрия).

В результате проведенных опытных и конструкторских работ разработано новое оборудование, включающее:

аппаратный блок с расширенными технологическими возможностями по сравнению с базовой моделью;

водоохлаждаемую цангу, позволяющую производить не только центровку сварочной головки автомата относительно обвариваемой трубки, но и осуществлять принудительное формирование сварного шва;

защитную камеру, обеспечивающую надежную газовую защиту зоны сварки и прилегающую к свариваемой трубе, а также позволяющую осуществлять регулировку торца электрода относительно поверхности сборки;

автономный переносной блок охлаждения.

Разработанная технология предусматривает ведение процесса сварки без применения флюсового реагента мощными импульсами тока с принудительным формированием сварного шва водоохлаждаемой цангой, что исключает возможность прожогов стенки трубы, а также неравномерное формирование шва, присущее сварке без принудительного отвода тепла от сварочной ванны. Режим сварки труб диаметром $10 \times 1,5$ мм с трубной решеткой следующий: $I_{II} = 280 \dots 300$ А; $I_{II} = 20 \dots 30$ А; $\tau_{II} = 0,44$ с; $\tau_{II} = 0,24$ с; $v_{св} = 6,4 \dots 6,6$ м/ч; $G_{Ar} = 10 \dots 15$ л/мин.

Оборудование и технология прошли проверку в условиях серийного производства теплообменных аппаратов из титановых сплавов. Статистическая обработка результатов показала, что технология сварки позволила на 60...75 % снизить пористость

Results of the work on development of the technology and equipment for joining tubes to tube-sheets are presented. The main technological operations are described, which allow producing sound welded joints.

сварных соединений по сравнению с ранее применяемыми технологиями крепления труб в трубных решетках. Сварные соединения имеют хороший товарный вид и обеспечивают постоянство проходного сечения труб в зоне сварного шва даже при значениях $h/b = 1,5 \dots 2$. Это особенно важно при проведении последующей вальцовки труб взрывом или электроимпульсом, так как отпадает необходимость калибровки зарядов [8].

С учетом полученных результатов изготовлена партия автоматов «Агат-1М», которые нашли применение при производстве теплообменных аппаратов из титановых сплавов с использованием теплообменных труб с наружным диаметром 10...56 мм и толщиной стенки $b = 1 \dots 2,5$ мм.

1. *Особенности* сварки тонкостенных титановых труб с трубными решетками биметалла титан-сталь для теплообменного оборудования / В. И. Михайлов, В. А. Семенов, М. И. Голдобаев и др. // Металлообработка. — 2002. — № 4. — С. 26–30.
2. *Мазуровский Б. Я.* Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. — Киев: Наук. думка, 1980. — 172 с.
3. *Царюк А. К.* Сварка труб с трубными досками (Обзор) // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 25–29.
4. *Царюк А. К.* Оборудование для сварки труб с трубными досками (Обзор) // Сварщик. — 2000. — № 4. — С. 12–13.
5. *Nenon B. K.* Orbital welding in record time // Welding J. — 1999. — № 3. — P. 51–55.
6. *Трояновский В. Э.* Опыт механизированной приварки труб к трубным решеткам теплообменных аппаратов // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 264–266.
7. *Патон Б. Е., Лесков Г. И.* Основы технологии электронно-лучевой сварки (Обзор) // Автомат. сварка. — 2003. — № 12. — С. 23–31.
8. *Изготовление и эксплуатация оборудования из титана* / Г. М. Шеленков, В. Е. Блащук, Р. К. Мелехов и др. — Киев: Техніка, 1984. — 120 с.

Поступила в редакцию 22.12.2004

АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ЛЕНТАМИ

Разработаны материалы и технология высокопроизводительной электрошлаковой антикоррозионной наплавки одной или двумя электродными лентами. Производительность процесса наплавки двумя электродными лентами составляет 30...50 кг/ч, доля основного металла в наплавленном — 5...8 %, что дает возможность получать необходимые эксплуатационные свойства уже в первом наплавленном слое. Это наилучшие показатели для процессов наплавки со свободным формированием.

Промышленное опробывание разработанная технология и материалы прошли при наплавке биметаллических листов и деталей атомного энергетического оборудования.

Назначение и область применения. *Высокопроизводительная антикоррозионная наплавка корпусных деталей атомного энергетического оборудования, сосудов для гидрокрекинга нефти, лопастей гидротурбин, биметаллических листов и т.п.*

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 2
Тел./факс: (380044) 287 63 57

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ И НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В. С. МАШИН, А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, кандидаты техн. наук, **В. Е. ФЕДОРЧУК**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ механических характеристик соединений алюминиевых сплавов различных систем легирования, полученных дуговой сваркой плавящимся и неплавящимся электродом, с использованием серийных и опытных сварочных проволок, легированных цирконием и скандием.

Ключевые слова: дуговая сварка, алюминиевые сплавы, плавящийся и неплавящийся электроды, скандийсодержащие присадки, механические свойства, сравнительный анализ

При изготовлении конструкций из современных алюминиевых сплавов наиболее широко используются два способа дуговой сварки — плавящимся и неплавящимся электродом. Они позволяют получать сравнительно высокие уровни прочности и пластичности швов и обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики сварных соединений.

Использование аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (ТИГ процесс) позволяет получать гладкую поверхность швов с плавным переходом к основному металлу. Этот способ требует особого внимания к подготовке поверхностей свариваемых металлов, фиксации кромок, а также к катодному разрушению оксидной пленки, которая оказывает основное влияние на образование характерных дефектов — неметаллических включений оксидной пленки в швах [1–3]. При соблюдении необходимых технологических требований по подготовке кромок, условиям фиксации стыка и электрическим параметрам процесса сварки может быть обеспечено высокое качество швов.

При сварке плавящимся электродом (МИГ процесс) повышается производительность, снижается тепловложение в свариваемый металл и уменьшаются остаточные напряжения и деформации. Однако при этом в швах и по зоне сплавления их с основным металлом часто возникают поры, образующиеся вследствие загазованности свариваемого

металла или нарушения технологического процесса сварки [1, 4].

Цель данной работы — проведение сравнительного анализа основных показателей механических свойств металла швов и сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных на оптимальных режимах сварки плавящимся и неплавящимся электродом с использованием стандартных и перспективных опытных проволок. Для сварки использовали листы из серийных и опытных алюминиевых сплавов различных систем легирования (табл. 1). Механические свойства этих сплавов приведены в табл. 2.

Стыковые соединения получали односторонней сваркой с применением стандартных и легированных скандием опытных сварочных проволок (табл. 3). Механизированную сварку плавящимся электродом осуществляли с помощью сварочной головки АСТВ-2м от источника питания ТПС-450, а неплавящимся — MW-450. После механического удаления проплава в корне швов соединения подвергали рентгеновскому просвечиванию. Из бездефектных участков швов изготавливали образцы для механических испытаний, позволяющих определять предел прочности сварных соединений $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, предел прочности металла швов $\sigma_{\text{в}}^{\text{III}}$, условный предел текучести металла швов $\sigma_{0,2}^{\text{III}}$, относительное удлинение δ^{III} , ударную вязкость $a_{\text{H}}^{\text{III}}$ и угол загиба соединений α .

Сварные соединения сплава АМг6. Анализ результатов механических испытаний соединений показал, что независимо от способа сварки плоские

Таблица 1. Химический состав алюминиевых сплавов, мас. %

Марка сплава	Система легирования	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Li	Zn	Sc	Ti	Zr
АМг6	Al-Mg-Mn	—	6,4	0,6	0,4	0,4	—	—	—	0,1	—
1420	Al-Mg-Li	—	5,4	0,2	0,2	0,15	2,1	—	—	—	0,1
1201	Al-Cu	5,7	—	0,2	0,3	0,2	—	—	—	—	0,1
1460	Al-Cu-Li	3,0	—	0,1	0,12	0,1	2,0	—	0,1	0,1	0,1
1925о.п.	Al-Zn-Mg	—	1,5	—	0,4	0,4	—	7,0	—	—	—
В96Цо.п.	Al-Zn-Mg-Cu	2,3	1,9	—	0,2	0,2	—	8,1	—	—	0,1



Таблица 2. Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Толщина листа, мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$a_{\text{н}}$, Дж/см ²	α , град
АМг6	6	343,3	164,6	23,1	22,4	135
1420	4	463,8	352,5	5,8	11,8	37
1420	6	448,0	300,4	9,1	8,3	24
1201	6	435,7	353,6	9,6	8,8	29
1460	3	573,6	532,2	3,5	2,4	17
1460	6	511,7	463,8	4,5	4,0	28
1925о.п.	3	472,9	426,0	9,3	17,2	54
В96Цо.п.	3	616,5	579,4	10	4,5	15

Примечание. Приведены средние значения по результатам испытаний 5...7 образцов.

Таблица 3. Химический состав алюминиевых сварочных проволок, мас. %

Марка электрода	Cu	Mg	Mn	Sc	Ti	Zr
СвАМг5	—	5,1	0,1	—	—	—
АМг5Sc	—	5,0	—	0,5	—	0,2
СвАМг6	—	6,2	0,4	—	0,1	—
СвАМг63	—	6,3	0,6	—	—	0,2
АМг63Sc	—	6,1	0,2	0,5	—	0,1
Св1201	6,0	—	0,3	—	0,1	0,2
1201Sc	6,0	—	—	0,5	0,1	0,2

образцы с усилением шва всегда разрушаются по зоне сплавления шва с основным металлом. Предел прочности сварных соединений, выполненных ТИГ процессом проволокой СвАМг6, находится на уровне 315 МПа (рис. 1). Применение проволок, легированных цирконием (СвАМг63) и скандием (АМг63Sc), обеспечивает повышение прочности сварных соединений в среднем на 6 и 11 МПа, а повышение прочности металла швов — соответственно на 26 и 30 МПа.

При сварке МИГ средние значения прочности сварных соединений несколько выше, чем при сварке ТИГ и составляют 323 МПа. Прочность металла швов, полученных сваркой МИГ серийной сварочной проволокой СвАМг6 (312 МПа), также почти на 20 МПа выше, чем сваренных процессом ТИГ. Использование проволоки, легированной скандием, повышает этот показатель до 330 МПа. При этом для всех способов сварки условный предел текучести и относительное удлинение металла швов сохраняются на уровне значений, получаемых при сварке серийной проволокой СвАМг6.

Соединения сплавов 1420. Разрушение плоских образцов с усилением шва, полученных обоими способами сварки, всегда происходит по зоне сплавления шва с основным металлом. Использование серийной сварочной проволоки СвАМг6 при сварке ТИГ обеспечивает прочность сварных соединений толщиной 4 мм на уровне 319 МПа, а толщиной 6 мм — на уровне 271 МПа. При этом прочность металла швов (как и при сварке МИГ) находится на уровне 315... 316 МПа (рис. 2). Применение проволок с цирконием и скандием позволяет повысить

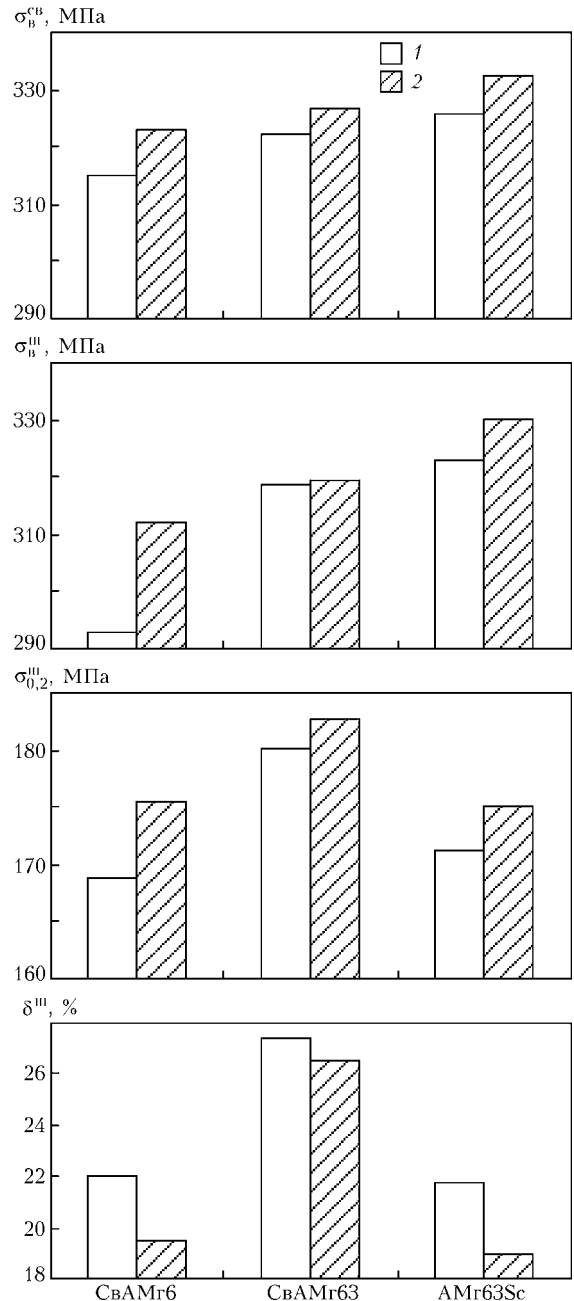


Рис. 1. Механические свойства соединений сплава АМг6, полученных при сварке неплавящимися (1) и плавящимися электродами (2) с использованием проволок различного химического состава

прочность соединений на 7... 14 МПа и прочность металла швов на 6... 9 МПа. При использовании всех исследуемых проволок ударная вязкость швов и угол загиба сварных соединений, выполненных сваркой ТИГ, превышают соответствующие показатели, полученные сваркой МИГ. Применение проволок, легированных цирконием и скандием, позволяет увеличить ударную вязкость швов до 26 Дж/см² на металле толщиной 4 мм и до 20 Дж/см² на металле толщиной 6 мм. При этом угол загиба тонколистовых соединений достигает 90°.

При сварке МИГ проволокой СвАМг6 средние значения прочности сварных соединений выше, чем при сварке ТИГ, и составляют соответственно 322

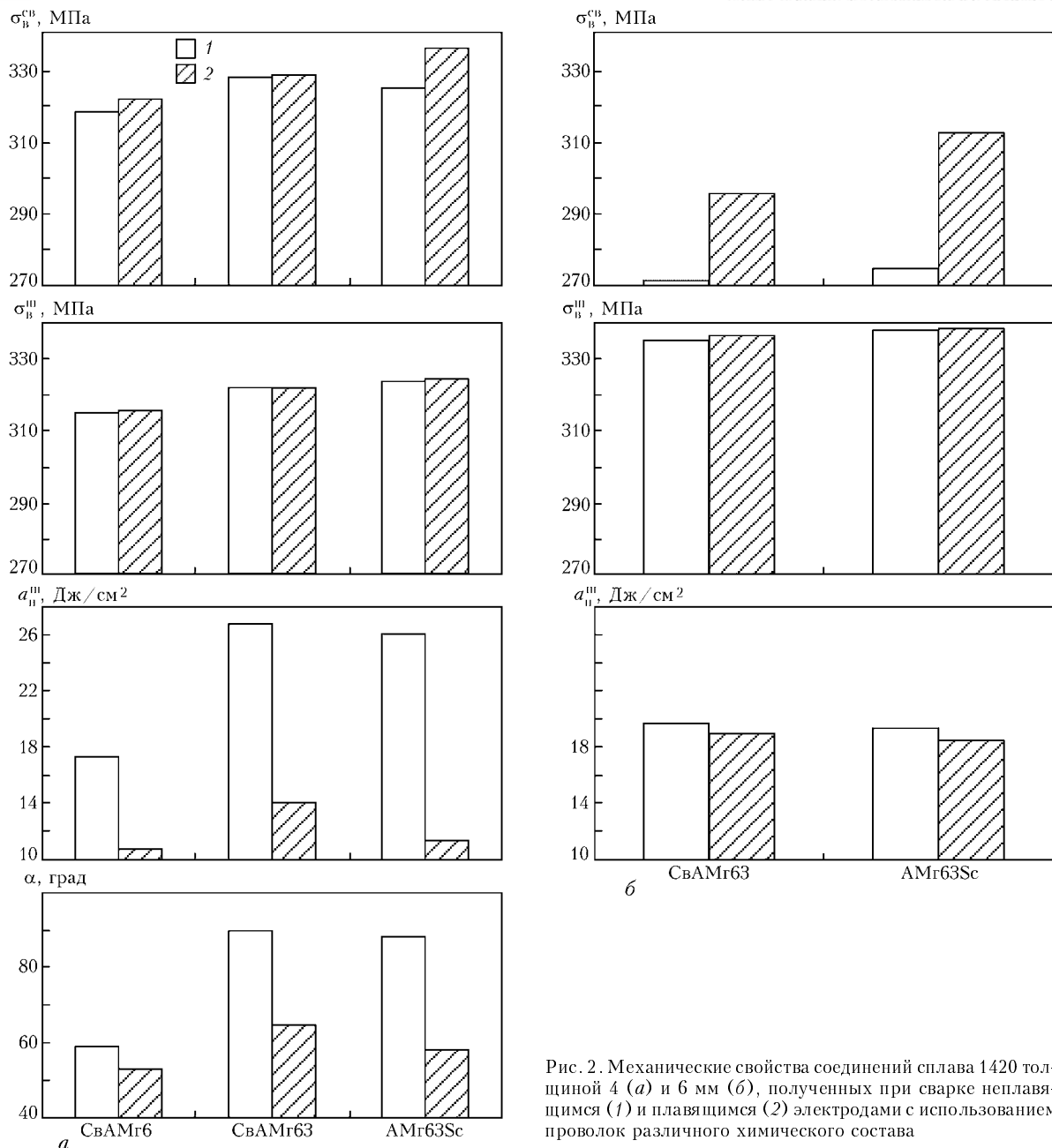


Рис. 2. Механические свойства соединений сплава 1420 толщиной 4 (а) и 6 мм (б), полученных при сварке неплавящимися (1) и плавящимися (2) электродами с использованием проволоки различного химического состава

и 295 МПа для металла толщиной 4 и 6 мм. Применение проволоки с цирконием и скандием позволяет еще в большей степени (по сравнению со сваркой ТИГ) повысить прочностные характеристики сварного соединения и металла шва. Так, на металле толщиной 4 мм $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{ш}}$ повышаются по сравнению с ТИГ на 2...12 МПа, а на металле толщиной 6 мм — соответственно на 25 и 35 МПа.

Соединения сплава 1201. Независимо от способа сварки и химического состава проволоки образцы сварных соединений сплава 1201 при растяжении разрушаются по зоне сплавления шва с основным металлом. Предел прочности соединений, выполненных сваркой ТИГ, находится на уровне 240 МПа (рис. 3). Введение скандия в швы практически не изменяет прочностные характеристики сварных соединений ($\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$), но значительно повышает прочность швов (от 236 до

256 МПа) и заметно снижает ударную вязкость металла (от 12 до 9 Дж/см²).

Применение сварки МИГ по сравнению с ТИГ позволяет повысить временное сопротивление разрыву сварных соединений до 266 МПа на серийной проволоке Св1201 и до 279 МПа на скандийсодержащей. Прочность и ударная вязкость металла швов также находятся на более высоком уровне при сварке МИГ. Использование проволоки, легированной скандием, приводит к увеличению от 260 до 272 МПа предела прочности металла швов и снижению их ударной вязкости от 18 до 14 Дж/см².

Соединения сплавов 1460. При сварке ТИГ проволокой Св1201 обеспечивается прочность соединений на уровне 307 МПа для листов толщиной 3 мм и 275 МПа для листов толщиной 6 мм (рис. 4). Легирование проволоки скандием позволяет существенно повысить предел прочности

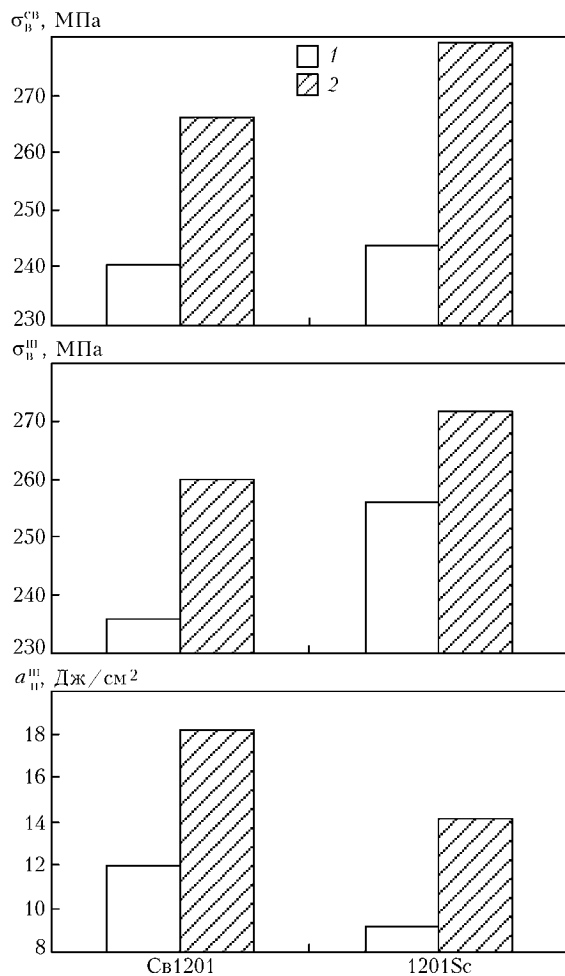


Рис. 3. Механические свойства соединений сплава 1201, полученных при сварке неплавящимся (1) и плавящимся (2) электродами с использованием проволок различного химического состава

и условный предел текучести металла швов. Так, при сварке ТИГ металла толщиной 3 мм прочность швов повышается с 251 до 288 МПа, а металла толщиной 6 мм — с 248 до 275 МПа. При этом

ударная вязкость металла швов снижается от 14 до 10 Дж/см², а угол загиба тонколистовых сварных соединений — от 174 до 79°.

Сварка МИГ по сравнению с ТИГ обеспечивает повышение прочностных характеристик сварных соединений. Так, при использовании проволоки Св1201 $\sigma_{в}^{св}$ повышается до 312 МПа для металла толщиной 3 мм и до 289 МПа для металла толщиной 6 мм. Металл швов также имеет более высокую прочность при сварке МИГ как на тонколистовом материале (280 МПа), так и на более толстом (287 МПа). При этом выше и условный предел текучести, и ударная вязкость металла швов.

Легирование швов скандием при сварке МИГ металла толщиной 3 мм приводит по сравнению с ТИГ к повышению на 4...5 МПа $\sigma_{в}^{св}$ и $\sigma_{в}^{ш}$ и увеличению на 20...23 МПа $\sigma_{в}^{св}$ и $\sigma_{в}^{ш}$ металла толщиной 6 мм. При этом снижается ударная вязкость швов от 16,8 до 14,5 Дж/см² и угол загиба со 130 до 35°.

Соединение сплава 1925о.п. Разрушение образцов с усилением шва независимо от способа сварки и химического состава проволоки происходит по основному металлу в зоне термического влияния. Предел прочности сварных соединений, выполненных ТИГ процессом проволокой СвАМг5, находится на уровне 358 МПа (рис. 5). Применение проволоки со скандием (АМг5Sc) обеспечивает повышение прочности металла швов от 288 до 314 МПа и снижение угла загиба соединений от 106 до 55°.

При сварке МИГ средние значения прочности соединений $\sigma_{в}^{св}$ несколько выше, чем при сварке ТИГ, и составляют 370 МПа. Прочность металла швов, полученных плавящимся и неплавящимся электродом серийной проволокой СвАМг5, находится примерно на одном и том же уровне (288 МПа). При использовании скандийсодержащей проволоки $\sigma_{в}^{ш}$ повышается в большей степени для швов, полученных МИГ, чем ТИГ, и составляет 321 МПа.

Таблица 4. Коэффициент механических свойств соединений K при сварке способами ТИГ и МИГ

Марка сплава	Толщина листа, мм	Марка электрода	ТИГ		МИГ		ТИГ		МИГ	
			$\sigma_{в}^{св}/\sigma_{в}^{ш}$	$\sigma_{в}^{ш}/\sigma_{в}^{ш}$	$\sigma_{в}^{св}/\sigma_{в}^{ш}$	$\sigma_{в}^{ш}/\sigma_{в}^{ш}$	$\alpha_{ш}^{ш}/\alpha_{ш}^{ш}$	$\alpha_{ш}^{ш}/\alpha_{ш}^{ш}$		
АМг6	6	СвАМг63	0,94	0,95	0,93	0,93	—	—	—	—
		АМг63Sc	0,94	0,97	0,94	0,96	—	—	—	—
1420	4	СвАМг63	0,70	0,71	0,69	0,69	2,27	1,19	2,43	1,76
		АМг63Sc	0,71	0,73	0,70	0,70	2,20	0,97	2,38	1,57
	6	СвАМг63	0,61	0,66	0,75	0,75	2,48	2,39	—	—
		АМг63Sc	0,66	0,70	0,75	0,75	2,43	2,33	—	—
1201	6	Св1201	0,55	0,61	0,54	0,60	1,36	2,07	—	—
		1201Sc	0,56	0,64	0,59	0,62	1,05	1,60	—	—
1460	3	Св1201	0,54	0,54	0,44	0,49	—	—	10,24	7,76
		1201Sc	0,54	0,55	0,50	0,51	—	—	4,65	2,12
	6	Св1201	0,54	0,57	0,48	0,56	3,60	4,20	—	—
		1201Sc	0,55	0,59	0,54	0,58	2,53	3,60	—	—
1925о.п.	3	СвАМг5	0,76	0,78	0,61	0,61	—	—	1,96	1,46
		АМг5Sc	0,76	0,78	0,66	0,68	—	—	1,02	0,94
В96Цо.п.	3	СвАМг5	0,49	0,57	0,47	0,49	—	—	2,87	2,07
		АМг5Sc	0,53	0,59	0,49	0,54	—	—	2,07	1,47

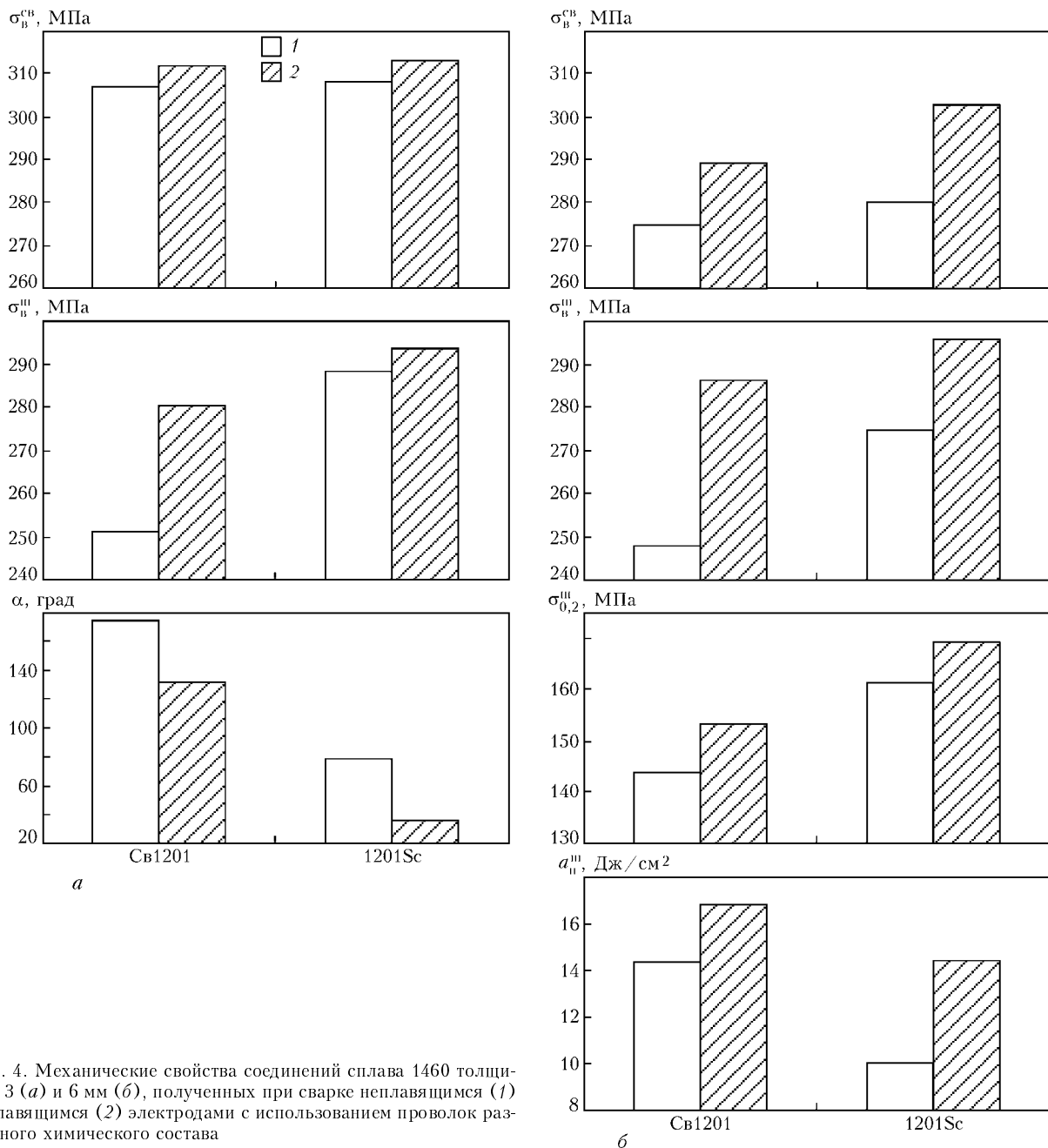


Рис. 4. Механические свойства соединений сплава 1460 толщиной 3 (а) и 6 мм (б), полученных при сварке неплавящимися (1) и плавящимися (2) электродами с использованием проволок различного химического состава

Во всех случаях угол загиба соединений, полученных сваркой МИГ, на 5...25° ниже, чем при ТИГ.

Соединения сплава В96Ц (опытная партия).

Все образцы с усилением шва разрушаются по зоне сплавления шва с основным металлом. Предел прочности соединений, выполненных ТИГ процессом серийной проволокой СВАМг5, составляет 302 МПа, а скандийсодержащей — 324 МПа (рис. 6).

МИГ процесс обеспечивает более высокие уровни прочности сварных соединений: при использовании проволоки СВАМг5 — 350 МПа, а проволоки АМг5Sc — 366 МПа. Предел прочности металла швов также более высокий при сварке МИГ и составляет соответственно 305 и 363 МПа. Использование легированной скандием проволоки способствует упрочнению металла швов, сваренных МИГ, на 28, а ТИГ — на 10 МПа. При этом

угол загиба сварных соединений низкий как с использованием серийной проволоки, так и легированной скандием.

Для проведения сравнительного анализа использовали коэффициенты *K*, *C* и *П*. Коэффициент механических свойств соединений *K* определяли из соотношения показателей свойств сварных соединений, полученных сваркой ТИГ и МИГ, к показателям соответствующих свойств основного металла (табл. 4). Изменение механических свойств металла шва *C* при замене процесса ТИГ на МИГ (табл. 5) определяли по формуле

$$C = [(МИГ - ТИГ) / ТИГ] \cdot 100, \%$$

Для оценки эффективности от введения скандия в присадочную проволоку использовали коэффициент *П* (табл. 6), определяемый из соотношения

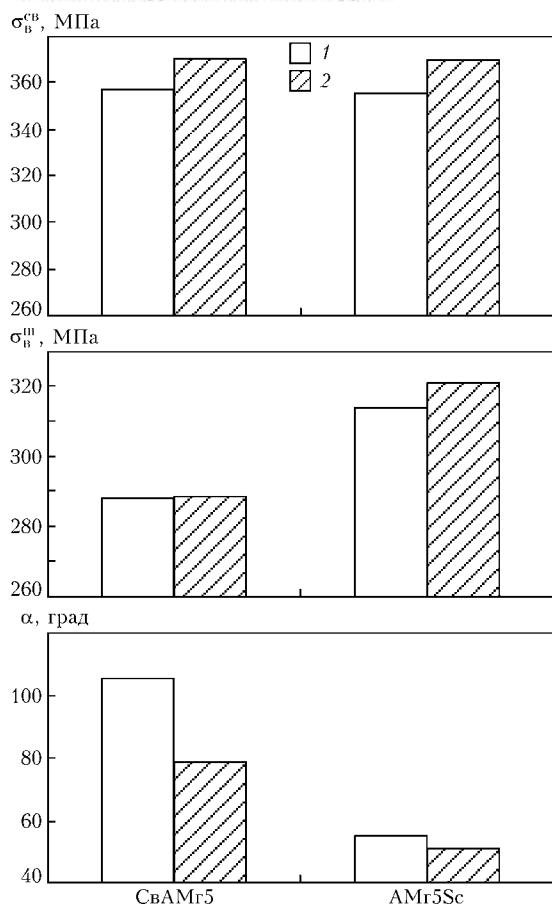


Рис. 5. Механические свойства соединений сплава 1925о.п., полученных при сварке неплавящимся (1) и плавящимся (2) электродами с использованием проволок различного химического состава

$$P = [(\text{присадка со Sc} - \text{присадка без Sc}) / \text{присадка без Sc}] \cdot 100, \%$$

Из табл. 4 видно, что наибольший коэффициент прочности имеют соединения сплава АМг6, выполненные сваркой МИГ с использованием присадки со скандием, а наименьший — соединения сложнoleгированного сплава В96Цо.п. Обобщив результаты, можно сделать вывод, что чем выше прочность основного металла, тем меньше коэффициент прочности сварного соединения. Исключение составляет сплав 1925о.п., что связано с его способностью самозакаливаться при охлаждении на воздухе. При замене способа сварки ТИГ на МИГ (табл. 5) независимо от химического состава свариваемого металла и марки присадочной проволоки прочностные характеристики соединений и металла швов возрастают. В наибольшей степени эта зависимость проявляется на алюминиевых сплавах, содержащих 2,3... 5,7 % Cu. Пластические свойства соединений (в частности, ударная вязкость) могут как повышаться, так и снижаться. Сварка МИГ сплавов системы Al-Cu(Li) обеспечивает повышение a_{II}^{III} на 14... 53 %, а Al-Mg-Li — снижение этого показателя на 4... 56 %. С повышением толщины свариваемого металла преимущества способа МИГ возрастают (сплав 1420 и 1460).

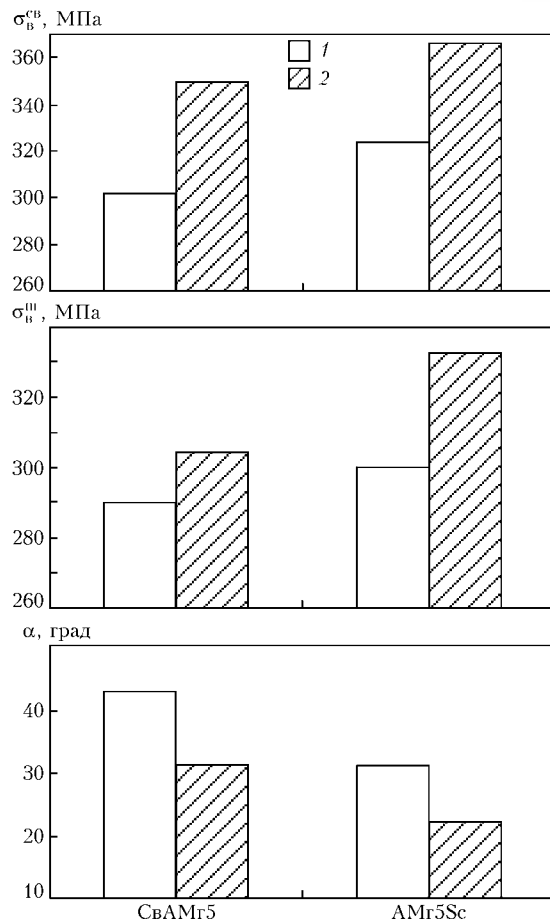


Рис. 6. Механические свойства соединений сплава В96Цо.п., полученных при сварке неплавящимся (1) и плавящимся (2) электродами с использованием проволок различного химического состава

Применение скандийсодержащих проволок приводит к значительному падению пластических свойств соединений и металла швов. Для всех рассматри-

Таблица 5. Изменение механических свойств соединений и металла швов при использовании МИГ процесса вместо ТИГ

Марка сплава	Толщина листа, мм	Марка электрода	Коэффициент С, %			
			$\sigma_{в}^{св}$	$\sigma_{в}^{ш}$	a_{II}^{III}	α
АМг6	6	СвАМг63	1,3	0,3	—	—
		АМг63Sc	3,0	2,0	—	—
1420	4	СвАМг63	1,0	0,1	-47,8	-38,5
		АМг63Sc	2,3	0,1	-56,2	-51,7
	6	АМг63	8,9	0,4	-3,9	—
		АМг63Sc	5,8	0,2	-4,5	—
1201	6	Св1201	10,6	9,3	51,7	—
		1201Sc	14,4	5,8	53,3	—
1460	3	Св1201	1,6	10,3	—	-31,8
		1201Sc	1,6	1,7	—	-119,4
	6	Св1201	5,3	13,5	14,3	—
		1201Sc	8,2	7,0	29,9	—
1925о.п.	3	СвАМг5	3,7	0,2	—	-34,2
		АМг5Sc	3,7	2,2	—	-7,8
В96Цо.п.	3	СвАМг5	15,9	4,5	—	-38,7
		АМг5Sc	13,1	9,7	—	-40,9

Таблица 6. Изменение механических свойств соединений металла шва при использовании скандийсодержащей присадки вместо стандартной

Марка сплава	Толщина листа, мм	Коэффициент Π , %			
		$\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$	$\sigma_{\text{н}}^{\text{н}}$	$\alpha_{\text{н}}^{\text{н}}$	$\alpha^{\text{св}}$
АМг6	6	$\frac{0,1}{1,7}$	$\frac{1,4}{3,3}$	—	—
1420	4	$\frac{1,0}{2,2}$	$\frac{0,8}{0,8}$	$\frac{-3,0}{-18,6}$	$\frac{-2,2}{-10,8}$
	6	$\frac{8,9}{5,8}$	$\frac{0,7}{0,5}$	$\frac{-1,9}{-2,5}$	—
1201	6	$\frac{1,3}{4,8}$	$\frac{8,5}{4,4}$	$\frac{-23,3}{-22,5}$	—
1460	3	$\frac{0,3}{0,3}$	$\frac{14,8}{4,7}$	—	$\frac{-54,6}{-72,7}$
	6	$\frac{1,9}{4,7}$	$\frac{10,9}{3,2}$	$\frac{-29,8}{-14,3}$	—
1925о.п.	3	0,0	$\frac{9,0}{11,1}$	—	$\frac{-48,1}{-35,4}$
В96Цо.п.	3	$\frac{7,2}{4,6}$	$\frac{3,4}{9,3}$	—	$\frac{-27,9}{-29,0}$

Примечание. В числителе приведены значения для способа ТИГ, в знаменателе — для МИГ.

ваемых сплавов угол загиба соединений может снижаться на 2...73, а ударная вязкость металла швов — на 2...30 %. В наименьшей степени скандий снижает пластичность металла сплавов системы Al-Mg-(Mn, Li), на которых угол загиба соединений снижается на 2,2...10,8 %, а ударная вязкость — на 1,9...18,6 (табл. 6). Исследования показали, что при относительно низкой прочности основного металла и высоком коэффициенте прочности сварных соединений, полученных при обычной сварке ТИГ (когда $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{ом}} \geq 0,9$), применение присадочных проволок, содержащих скандий, является малоэффективным средством повышения прочностных характеристик соединений и приводит к значительному снижению пластических свойств металла — ударной вязкости швов и угла загиба соединений.

Таким образом, сравнительный анализ результатов показал, что прочность сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов при сварке плавящимся электродом всегда выше, чем выполненных неплавящимся электродом. Это объясняется более низким уровнем погонной энергии при сварке плавящимся электродом и соответственно меньшим разупрочнением металла в зоне сплавления и в зоне термического влияния [5]. Особенно это заметно при увеличении толщины листов на чувствительных к тепловложению высокопрочных алюминиево-литиевых сплавах 1420 и 1460.

Прочность металла швов зависит от состава сварочной проволоки и способа сварки. Содержащийся в проволоке скандий при кристаллизации

металла шва входит в твердый раствор, повышает дисперсность фаз и способствует формированию кристаллов субдендритной формы, что приводит к повышению прочности швов. Более высокая скорость кристаллизации жидкого металла, достигаемая при сварке плавящимся электродом, обеспечивает более высокую степень насыщения твердого раствора как основными легирующими элементами, так и скандием [6]. В результате в большинстве случаев такие швы по прочности превосходят швы, полученные неплавящимся электродом. Кроме того, прочностные и структурные характеристики швов оказывают определенное влияние на свойства зоны сплавления, что сказывается в целом на механических свойствах сварных соединений.

Выводы

1. Предел прочности сварных соединений современных алюминиевых сплавов основных систем легирования, полученных дуговой сваркой плавящимся электродом, на 1...16 % выше, чем соединений, выполненных неплавящимся электродом. В то же время пластические свойства сварных соединений (ударная вязкость металла швов и угол загиба соединений) выше при сварке неплавящимся электродом.
2. Преимущества применения процесса МИГ возрастают с увеличением толщины свариваемого металла. Так, на сплавах 1420 и 1460 при толщине листов 3...4 мм преимущества МИГ процесса составляют 1...2,5 %, а при толщине листов 6 мм — 5...9 %.
3. Применение сварочных проволок, легированных скандием, при дуговых способах сварки алюминиевых сплавов позволяет повысить прочностные свойства металла швов и сварных соединений в целом. Степень упрочнения швов в результате введения скандия зависит от химического состава сплава, толщины листов и структуры литого металла швов, в то же время приводит к уменьшению ударной вязкости металла швов и угла загиба сварных соединений.

1. *Рабкин Д. М.* Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
2. *Ищенко А. Я., Поляцкий А. Г., Яворская М. Р.* Предотвращение включений оксидной пленки в швах при сварке алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1989. — № 6. — С. 38–41.
3. *Поляцкий А. Г.* Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) // Там же. — 2001. — № 3. — С. 38–40.
4. *Левченко О. Г., Машин В. С.* Санитарно-гигиеническая характеристика процесса сварки плавящимся электродом в инертных газах алюминиевого сплава АМг6 // Там же. — 2003. — № 1. — С. 48–50.
5. *Влияние* способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1460 / Т. М. Лабур, Андр. А. Бондарев, А. В. Лозовская и др. // Там же. — 2001. — № 7. — С. 12–16.
6. *Повышение* прочности швов при дуговой сварке сплава 1420 с применением скандийсодержащих присадок / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Поляцкий и др. // Там же. — 2002. — № 1. — С. 11–15.



УСТРОЙСТВА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

Е. Н. ЕРЕМИН, д-р техн. наук (Омский гос. техн. ун-т, РФ)

Описаны новые технологические приемы, оборудование и оснастка, с помощью которых исключается образование дефектов в швах, выполненных электрошлаковой сваркой. Для качественного формирования шва в начале процесса используют устройство для сигнализации оплавления свариваемых кромок, обеспечивающее переход от стадии наведения шлаковой ванны собственно к процессу сварки. Для устранения усадочной раковины применено устройство для контроля за уровнем металлической ванны, обеспечивающее качественное формирование шва на заключительном этапе ЭШС.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, формирование шва, устройства для сигнализации

В ракетной и авиационной технике широко применяется однопроходная сварка конструкций значительной толщины из жаропрочных сталей и сплавов. Способ электрошлаковой сварки (ЭШС), отличающийся широкими металлургическими и технологическими возможностями, является весьма перспективным при изготовлении указанных изделий, поскольку в качестве электрода можно использовать стержневые прутки соответствующего проката, а также высокофторидные флюсы, которые уменьшают угар активных элементов, ответственных за жаропрочные свойства сплавов.

Однако у сварных соединений, полученных способом ЭШС, имеют место специфические дефекты — несплавление кромок, образование подрезов в переходной зоне и усадочные раковины на участке в конце швов. В связи с этим необходимо существенно увеличить размеры входных карманов и выходных планок, что обуславливает наличие значительных прибылей в начале и конце шва. Такой технологический прием приводит к увеличению расхода металла и трудоемкости выполнения последующей механической обработки. Вслед-

ствие этого при изготовлении заготовок из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов технологи часто отказываются от сварки в пользу различных способов горячего передела —ковки, штамповки, прессования, раскатки. Поэтому разработка оборудования и оснастки, с помощью которых указанные недостатки исключаются, является актуальной задачей.

С целью устранения отмеченных выше дефектов разработаны устройства, улучшающие качество формирования шва, выполненного ЭШС (рис. 1).

Для решения указанных проблем необходимо первоначально обеспечить качественное сплавление кромок в начале сварки. Для этого следует предварительно оплавить торцы заготовок, поскольку неоплавленные кромки не соединяются с металлом шва и кристаллизация последнего происходит как бы в металлической изложнице. На этой стадии ЭШС решающее значение приобретает определение момента перехода от процесса наведения шлаковой ванны к сварке. С этой целью разработано устройство для сигнализации оплавления свариваемых кромок. Оно состоит из формирующего водоохлаждаемого приспособления и блока сигнализации оплавления кромок шва (рис. 1). В нижней части передней накладке приспособления

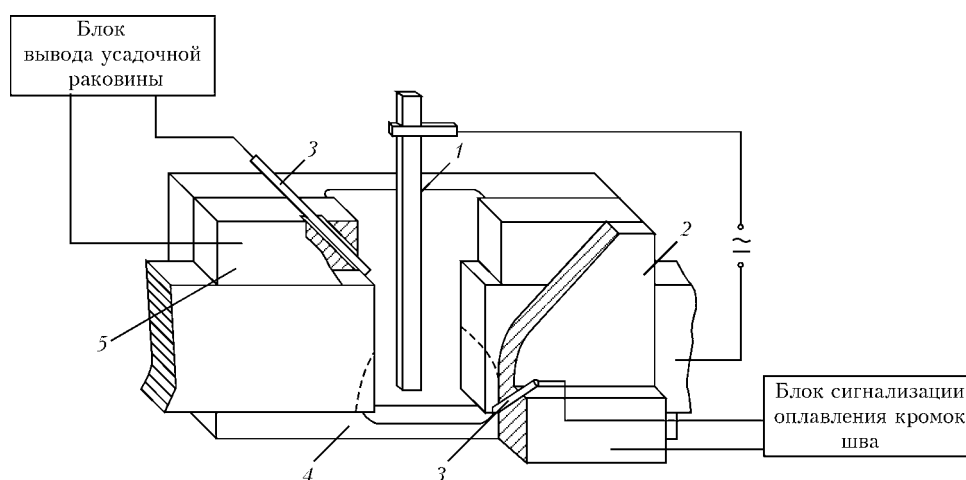


Рис. 1. Схема комплекса для ЭШС с устройствами для формирования шва: 1 — плавящийся электрод; 2 — передняя накладка формирующего водоохлаждающего приспособления; 3 — щуп; 4 — входной карман; 5 — выходная планка

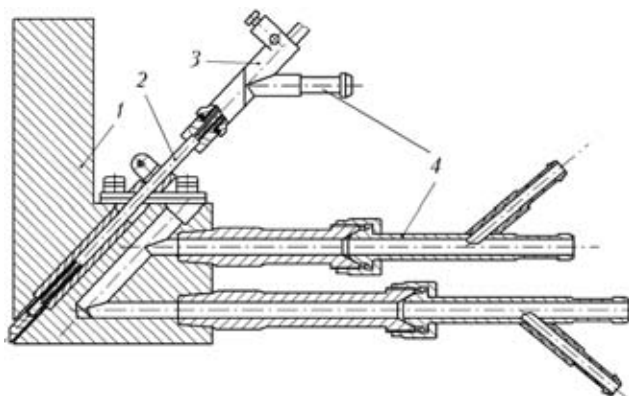


Рис. 2. Схема передней накладки с датчиком оплавления кромок: 1 — формирующая накладка; 2 — щуп; 3 — корпус щупа; 4 — система охлаждения

имеется отверстие, куда устанавливается водоохлаждаемый щуп с зажимом цапгового типа (рис. 2). В исходном положении щуп контактирует с кромкой стыка в месте ее первоначального оплавления. После расплавления кромки контакт щупа с изделием нарушается и в этот момент возникает резкий скачок потенциала от протекающего через шлак сварочного тока. Возникновение потенциала подтверждается с помощью снятия напряжения на щупе (осциллограммы). Этот потенциал и является контрольным сигналом о проваре свариваемых кромок в начальной стадии процесса сварки. Он со щупа поступает в блок сигнализации оплавления кромок шва и сообщает о переходе к процессу сварки. В устройстве применяется вольфрамовый щуп, который во избежание «примораживания» специальным механизмом втягивается во внутрь формирующей накладки приспособления.

Для обеспечения качественного формирования шва при ЭШС необходимо осуществлять контроль за уровнем металлической ванны. С этой целью создано устройство для вывода усадочной раковины с датчиком-сигнализатором, блок-схема которого представлена на рис. 3. В устройство входит вольфрамовый щуп, который погружается в шлаковую ванну. Конструктивное исполнение данного устройства аналогично описанному выше устройству для сигнализации оплавления свариваемых кромок. Оно состоит из охлаждаемой выходной планки с отверстием, в которое также вставлен щуп с зажимом цапгового типа. Для исключения образования шлакового гарнисажа на щупе процесс идет без охлаждения. Контрольным сигналом для срабатывания системы автоматики является изменение потенциала на участке щуп-металл от протекания через шлак сварочного тока. С помощью осциллографа определено, что потенциал изменяется в зависимости от расстояния от щупа до расплавленного металла. Входное сопротивление контролирующего органа на порядок выше, чем у шлакового гарнисажа, что обеспечивает надежную работу устройства в случае зашлаковки.

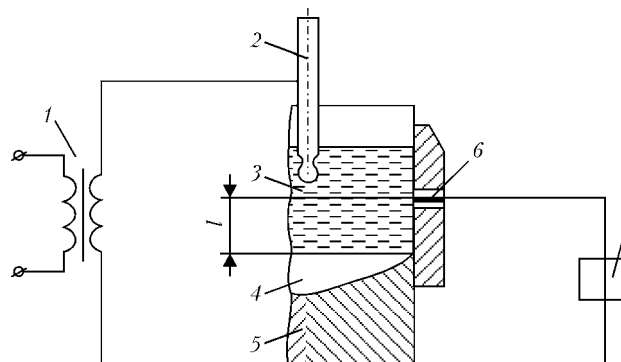


Рис. 3. Блок-схема устройства для вывода усадочной раковины: 1 — сварочный трансформатор; 2 — плавающий электрод; 3, 4 — соответственно шлаковая и металлическая ванна; 5 — шов; 6 — щуп; 7 — контролирующий орган

Данное устройство позволяет контролировать уровень расплавленного металла, не допуская касания щупом последнего. После получения контрольного сигнала система автоматики сварочного аппарата начинает постепенно поднимать электрод из шлаковой ванны, обеспечивая тем самым вывод усадочной раковины.

Производственные испытания показали, что применение ЭШС при изготовлении заготовок ответственного назначения из жаропрочных никелевых сплавов с помощью описанных выше устройств обеспечивает качественное формирование швов и снижение размеров прибыльной части до 1,5... 2,0 мм, что значительно повышает коэффициент использования дорогостоящих сплавов и уменьшает трудоемкость изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов.

Выводы

1. Во избежание несплавления кромок и образования непроваров в переходной зоне на начальной стадии ЭШС предлагается использовать вольфрамовый щуп, который контактирует с кромкой стыка и в момент ее оплавления регистрирует возникновение потенциала от протекания через шлак сварочного тока. Этот потенциал является контрольным сигналом о проваре свариваемых кромок и обеспечивает переход от процесса наведения шлаковой ванны к сварке.

2. Вольфрамовый щуп, погруженный в шлаковую ванну, используется для регистрации потенциала на его вылете. Благодаря этому появляется возможность контролировать уровень металлической ванны без касания ее щупом, что позволяет осуществить своевременный подъем электрода из шлаковой ванны, обеспечив тем самым вывод усадочной раковины.

3. Рассмотренные устройства, повышающие качество формирования шва при ЭШС, целесообразно использовать при производстве изделий ракетной и авиационной техники.



New techniques, as well as equipment and fixtures are described, which are used to prevent defect formation in welds made by electroslag welding. To achieve a sound weld formation, a device signaling the surface-melting of the edges being welded is used at the start of the welding process, this ensuring transition from the stage of inducing a slag pool to the welding process proper. A device controlling the metal pool level is used to eliminate the shrinkage cavity, thus providing a sound weld formation at the final stage.

Поступила в редакцию 08.02.2005

УДК 621.791.75:621.311.6

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК СВАРОЧНОГО ТОКА

В. А. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Н. И. ПОСТОЛАТИЙ, А. В. МОТРИЙ, инженеры (КЗЭСО)

Описан разработанный и выпускаемый на КЗЭСО многофункциональный источник для сварочного тока применения в различных процессах сварки, наплавки, резки, в том числе с использованием дуготронов.

Ключевые слова: технологии сварки, плазменно-дуговой процесс, источник сварочного тока, назначение, надежность, многофункциональность, технические решения

В последнее время разработаны новые технологии сварки с использованием эффектов, присущих дуговым процессам. К их числу следует отнести плазменно-дуговой процесс, реализуемый с помощью специальных устройств (плазмотронов со специальными оксидными катодами) на открытом воздухе [1]. Этот процесс весьма эффективен для решения задач, связанных с интенсивным нагревом, сваркой и др. В ряде случаев применение этого процесса позволяет выполнить работы, которые ранее не могли быть осуществлены, например сварка металлов с углеродистыми материалами при создании сварных токоподводов к графитовым электродам, широко используемым в электрометаллургии при производстве электродов [2]. В

этом случае плазменно-дуговой процесс на открытом воздухе практически не имеет альтернативы.

Для осуществления указанного процесса требуется источник сварочного тока, обеспечивающий падающую внешнюю вольт-амперную характеристику. Требования к его конструкции обуславливаются необходимостью достижения высоких значений напряжений холостого хода (более 120 В) и рабочего напряжения (50...60 В). Кроме того, специфика возбуждения плазменной дуги, а также необходимость повышения долговечности работы упомянутого оксидного катода и соблюдение правил техники безопасности в этом случае определяют способ управления работой такого источника сварочного тока.

Специалистами КЗЭСО и ИЭС им. Е. О. Патона разработан источник сварочного тока КИУ-701 (рисунок), который после проверки и доводки был изготовлен для промышленного применения. Благодаря ряду технических решений, реализованных в КИУ-701, его можно отнести к числу многофункциональных. Кроме указанных выше возможностей, в нем может быть установлена жесткая внешняя вольт-амперная характеристика, напряжение холостого хода снижено до 75 В, а рабочее напряжение выбрано в диапазоне, необходимом для реализации механизированных и автоматизированных дуговых процессов. При этом источник сварочного тока КИУ-701 обеспечивает работу полуавтоматов различного назначения: для сварки, наплавки и резки металлов сплошными (в среде защитных газов и под флюсом) и порошковыми самозащитными электродными проволоками наиболее распространенных диаметров, в том числе, и более 3 мм.

Источник питания КИУ-701 испытан в комплекте с полуавтоматами блочно-модульной конструкции типа ПШ107В. При этом осуществлены высокопроизводительные и качественные процессы сварки, наплавки и резки сталей, чугунов и алюминия. В ходе экспериментов стало очевидно, что в ряде случаев, например, при создании токоподводов (жестких конструкций токоведущих



Внешний вид многофункционального источника сварочного тока

© В. А. Лебедев, Н. И. Постолатий, А. В. Мотрий, 2005



шин, гибких токоведущих связей и др.), к графитовым электродам в электрометаллургии с помощью многофункционального источника сварочного тока типа КИУ-701, а также дуготрона и полуавтоматов можно осуществить полный комплекс работ по сварке.

Базовые технические решения, которые позволяют с помощью источников КИУ-701 реализовывать множество технологий, основываются на опыте применения апробированных в промышленности серийных конструкциях источников сварочного тока — КИУ-501 и КИУ-1201. Это относится непосредственно к силовой части, а также к оригинальной разработке универсального электронного регулятора, обеспечивающего получение внешних вольт-амперных характеристик различных типов — жестких, крутопадающих, веерных (с возможностью выбора степени крутизны). Это реализуется за счет соответствующих обратных связей по току или напряжению. Высокое качество дугового процесса обеспечивается введением в регулятор специальных корректирующих звеньев для формирования необходимых динамических свойств источника питания. Кроме указанного выше, в электронном регуляторе предусмотрена функция

защиты от сверхтоков короткого замыкания — штыковая внешняя характеристика, пиковую точку которой можно изменять в широких пределах.

Оригинальным техническим решением в указанном источнике является устройство для обеспечения программного нарастания сварочного тока с регулированием уровней тока и времени их установления. Элементы программного регулирования выведены на лицевую панель источника КИУ-701. Введение в конструкцию источника такого регулятора прежде всего позволяет обеспечить надежную и безопасную работу оксидного катода дуготрона при плазменно-дуговом процессе. Этот регулятор может быть использован и для решения других технико-технологических задач, связанных со сваркой и наплавкой сталей и сплавов алюминия.

Источник сварочного тока КИУ-701 рекомендован для применения на предприятиях цветной и черной металлургии, а также связанных с производством углеграфитовых материалов.

1. *Лакомский В. И.* Оксидные катоды электрической дуги. — Запорожье, 1997. — 192 с.
2. *Лакомский В. И.* Сварка открытой дугой углеродистых материалов с металлами // Автомат. сварка. — 1995. — № 8. — С. 11–18.

A multi-functional source is described, which is manufactured by Kakhovka Plant of Electric Welding Equipment for application in different welding processes of welding, surfacing, cutting, including use of arcotrons.

Поступила в редакцию 13.01.2005

УДК 621.791.669.14/.15+519.87

ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА «ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ»*

Ю. А. СКОСНЯГИН, А. Б. ЛЕСНОЙ, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев)

Рассмотрено программное обеспечение, позволяющее подбирать покрытые электроды для ручной дуговой сварки. Информационная система содержит наиболее полные сведения по электродам (более 500 наименований), выпускаемым в странах СНГ. Кроме справочной информации, программа предоставляет широкие возможности для многопараметрического поиска по заданным пользователем критериям.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка, покрытые электроды, информационная система, программное обеспечение, многопараметрический поиск

Анализ состояния и перспектив развития сварочного производства показывает, что ручная дуговая сварка покрытыми металлическими электродами остается одним из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений. При выполнении сварочных работ

важным моментом является рациональный выбор электродов, обеспечивающий требуемое качество сварного шва.

При выборе электрода следует учитывать не только область применения, необходимый химический состав и механические свойства наплавленного металла, но и ряд дополнительных требований к некоторым параметрам, которые определяют условия сварки, а именно: пространственное положение, диаметр электрода, род, полярность и силу сварочного тока, напряжение дуги, скорость сварки, температуру предварительного подогрева (последние два параметра характерны для сварки сталей, требующих специальных технологических приемов). Кроме перечисленных, объективных

* По материалам доклада, заслушанного на Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». — Кацивели, Крым, 13–17 сент. 2004.



Информационно-поисковая система выбора электродов для ручной дуговой сварки

Неб Лицензия

Свойства электрода Поставщики электрода Поиск электродов

847 По типу По группе сталей По поставщику По хим. составу металла шва По мех. свойствам металла шва

ТИП 385 - электроды для сварки легированных сталей повышенной прочности

Марка электрода	УОНИИ-13/45P	342A	Марка электрода	УОНИИ-13/85У	Условное обозначение	385 УОНИИ-13/85У-д-ЛД	ГОСТ	9466-75, 9467-75	ТИП	385
	УОНИИ-13/55	350A				E-12Г2М-0-626				
	УОНИИ-13/55АА	350А	Марка проволоки	ISO	DIN	AWS	BS			
	УОНИИ-13/55К	346А				E12016				
	УОНИИ-13/55Р	350А								
	УОНИИ-13/85У	385								

Область применения

Для сварки вагонным способом рельсов и стержней арматуры железобетонных конструкций, а также для обычной дуговой сварки конструкций из легированных сталей повышенной прочности с Gv <= 833 МПа, работающих в тяжелых условиях.

Вид покрытия	Род тока	Полярность	Коэффициент расхода
основной	~	+	1,50

Диаг.	Исв.	А	Производительность	Выход наплавленного	Положение свариваемых швов в пространстве
мм	г/мин	г/А.ч	%		
ЩЛ-11	3-08x2	3,0	90-120	16,5	+ Низкое
ЩЛ-11С/С4	3-08x2	4,0	150-180	23,5	+ Угловые, тавровые швы
ЩЛ-14	3-08Mx	5,0	180-220	30	+ Вертикальные, снизу вверх
ЩЛ-17	3-10x5	6,0	220-350	46,5	+ Гориз. на вертикал. поверхности
ЩЛ-17-63					- Вертикальное сверху вниз
ЩЛ-18					+ Потолочное

Химический состав наплавленного металла, мас. %:

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Nb	S	P	Dr
ЩЛ-19	0.10-0.15	1.50-2.30	0.50-1.00			0.50-0.80			0.035 max	0.035 max	

Механические свойства металла шва: КСУ, Дж/кв.см, при Т(С) || КСВ, Дж/кв.см, при Т(С)

Гв, МПа	Гт, МПа	Относ. удл. %	+20	-20	-40	-70	+20	-20	-40	T35, град С
ЩЛ-20А	860	780	12 min	67 min						

Технологические особенности сварки

Сварку выполнять короткой дугой. Свариваемые крошки тщательно зачищать от окисления, масла, ржавчины и других загрязнений. Для формирования сварного шва используются специальные формы - остающиеся (из стали) или временные (например, из меди), удаляемые после сварки.

Прокалка

370 градусов в течение 0.8 часа.

Дополнительная информация

Металл шва характеризуется высокой стойкостью против образования кристаллизационных трещин и низким содержанием водорода. Сварку производить от источника питания с U_{исх} >= 65 В.

385 легированных сталей повышенной прочности

Рис. 1. Справочная информация по электроду УОНИ-13-85У

технологических критериев, также необходимо учитывать сугубо субъективные критерии такие, как ценовой фактор и наличие на текущий момент информации о самих поставщиках данного электрода на рынке, о наличии у отдельно взятого поставщика соответствующих сертификатов качества и сроках их действия. Сегодня отечественными и зарубежными производителями выпускается значительное количество марок электродов для ручной дуговой сварки, при этом следует отметить, что для отдельно взятого технологического процесса сварки могут быть использованы электроды различных марок. В этих условиях выбор электродов представляет собой сложный многопараметрический поиск и решение этой задачи может существенно облегчить использование специализированного программного обеспечения «Электроды для ручной дуговой сварки», разработанного в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

Информационная система содержит информацию об электродах, выпускаемых странами как СНГ, так и некоторыми зарубежными. Функционально программа спроектирована так, что является электронным справочником, который предоставляет наиболее полные сведения о выбранном электроде, кроме того, в нем реализованы широкие воз-

можности поиска электродов по заданным критериям.

Справочные сведения об электродах включают: основное назначение; область, технологические особенности и дополнительные сведения о применении; вид электродного покрытия; род тока; полярность; допустимые пространственные положения; рекомендуемые режимы и производительность сварки; коэффициенты расхода и выхода, механические свойства и химический состав наплавленного металла шва, а также сведения о поставщиках данного электрода, условные обозначения, маркировку электродов в соответствии с американским (AWS), международным (ISO), немецким (DIN) стандартами и ГОСТом (стран СНГ). На рис. 1 представлено главное окно программы, в левой части которого расположен список электродов, детальные сведения для отдельно выбранного электрода (например, УОНИИ-13/85У) выводятся в дополнительном информационном окне, аналогично в отдельном окне выводятся сведения о поставщике (рис. 2).

Для поисковых целей в программе реализован многопараметрический инкрементальный отбор из списка имеющихся электродов. Наиболее просто выполняется поиск по заранее известной марке электрода, когда необходимо получить только



Цена	Дата	Поставщики	Город	Адрес	Индекс	Телефон / Факс
23.4	2003.02.15	ОАО АО "Спец электрод"	Москва	Волгоградский просп	109316	(095) 173-5030
12.54	2003.01.23	МГВП "ГЕФЕСТ"	Киев	ул. Боженко, 11	3150	(044) 220-1619

Электроды для которых поставщики: определены неопределены отменить

Поставщик: МГВП "ГЕФЕСТ"
 Город: Киев
 Адрес: ул. Боженко, 11
 Индекс: 3150 Телефон / Факс: (044) 220-1619

Цена: 12.54 Дата: 2003.01.23

Сертифицирован: ОА Нектар до 2003.02.16

Рис. 2. Информация о поставке электрода АНЖР-2

Информационно-поисковая система выбора электродов для ручной дуговой сварки

Нейр Лицензия

Свойства электрода Поставщики электрода **Поиск электродов** По группе стали

По типу По группе стали По поставщику По хим. составу металла шва По мех. свойствам металла шва Марк

Свариваемые материалы
 Однородные Разнородные Разнородные одного структурного класса

Структурный класс стали: Перлитный

Электрод <- Группа стали 2

Среднеуглеродистые и низколегированные (Перлитный)
 Низколегированные специального назначения
 Среднеуглеродистые и низколегированные (Перлитный)

Группа стали 2 <- Группа стали 1
 Низкоуглеродистые (Перлитный)
 Среднеуглеродистые и низколегированные (Перлитный)
 Низколегированные специального назначения (Перлитный)

Условия поиска электродов

Основные
 По типу электрода По группе стали По поставщику Отменить

Дополнительные
 Электроды, для которых поставщики: определены неопределены отменить

Вид покрытия: []

Наличие сертификата

По химическому составу наплавленного металла, мас. %:

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Nb	S	P	Dr
Min	0.08-0.10	0.45-0.80									
Max	0.25 max										

По механическим свойствам металла шва: КСЧ, Дж/кв. см, при T (C) || КСЧ, Дж/кв. см, при T (C)

	Бв, МПа	Бт, МПа	Относ. удл, %	+20	-20	-40	-70	+20	-20	-40	T35, град
Min	410 min		22 min								
Max											

Температура подогрева и рекомендуемый отпуск

УОНИ-13/45 Группы стали
 1 Среднеуглеродистые и низколегированные повышенной прочности
 2 Низкоуглеродистые (Перлитный)

Температура подогрева: 300-400
 Рекомендуемый отпуск: 600-650

Дополнительные рекомендации
 Отпуск непосредственно после сварки.

Рис. 3. Средства многопараметрического поиска электродов



справочные данные. В этом случае достаточно ввести название марки в текстовое поле, расположенное над списком электродов, при этом текущий список электродов будет постоянно ограничиваться в соответствии с вводимой текстовой маской.

В тех случаях, когда необходимая марка электрода заранее неизвестна, программа предоставляет возможности многовариантного поиска с использованием критериев двух типов. К первому типу относятся взаимоисключающие критерии: тип электрода (67 наименований), рекомендации по свариваемости (14 групп разнородных материалов), фирмы-поставщики электродов (102 наименований). Ко второму типу относятся взаимодополняющие критерии, а именно: химический состав и механические свойства металла шва (11 характеристик в каждом критерии), вид электродного покрытия (16 наименований), наличие информации о поставщиках.

При использовании критериев поиска первого типа выбирается необходимая вкладка главного окна (рис. 3), далее на ней выбирается соответствующий подкритерий, согласно с которым ограничивается текущий список электродов. В случае, приведенном на рис. 3, демонстрируется порядок выбора электродов, исходя из рекомендаций по свариваемости разнородных групп сталей. Сначала в правой крайней таблице указывается группа стали первого материала (низкоуглеродистые стали перлитного класса), для выбранной группы в таблице, расположенной левее, выводятся имеющиеся варианты, при выборе второй группы стали (среднеуглеродистые и низколегированные повышенной прочности перлитного класса) крайняя левая таблица будет содержать рекомендуемый для сварки список электродов. Аналогично можно получить выборку для отдельного типа электродов или поставщика. Путем комбинирования вывода списков поставщик-электроды и электрод-поставщики можно анализировать альтернативные варианты приобретения электродов.

Software allowing selection of covered electrodes for manual arc welding is considered. The information system contains the most comprehensive data on electrodes (more than 500 grades) manufactured in the CIS countries. In addition to the reference information, the software provides wide possibilities for multi-parametrical retrieval on the basis of criteria set by a user.

Рассмотрим порядок использования критериев поиска второго типа, которые могут применяться самостоятельно и в качестве взаимодополняющих параметров к критериям поиска первого типа. В случае, приведенном на рис. 3, заданы дополнительные критерии поиска электродов — ограничения на химический состав и механические свойства наплавленного металла, а также наличие информации о поставщике.

Следует отметить, что программа автоматически обновляет текущий список электродов, который удовлетворяет каждому новому определению критерия поиска. Таким образом, пользователь имеет возможность последовательно уточнять результирующий набор данных. Особенностью организации программы является открытость критериев поиска, которая состоит в том, что на соответствующих вкладках представлена соответствующая сводная информация, которая позволяет ориентироваться на доступный диапазон значений, исключая эффект «блуждания в темной комнате», при поиске информации.

Информационная система спроектирована таким образом, что функции браузера и редактора базы данных совмещены в одной программе, что позволяет конечному пользователю поддерживать актуальность данных путем добавления новой и корректировки имеющейся информации, исходя из собственных потребностей.

Программное обеспечение предназначено для инженерно-технических работников промышленных и строительных предприятий, проектных, конструкторских и научно-исследовательских организаций, производителей, поставщиков и дистрибьютеров электродов.

Программное обеспечение функционирует в среде Windows 9x/Me/2000, для установки требуется 6 МБт дискового пространства, дополнительная информация находится по адресу:

<http://www.paton.kiev.ua>.

Поступила в редакцию 12.01.2005



НОВОСТИ

ТРЕХПУШЕЧНАЯ УСТАНОВКА КЛ-117 ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ БУРОВЫХ ДОЛОТ

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана и изготовлена установка для ЭЛС буровых долот (рис. 1). Она предназначена для электронно-лучевой сварки буровых долот диаметром до 17,5" с одновременным выполнением трех швов, благодаря чему повышается точность размеров буровых долот и производительность сварки.

Применение в источнике ускоряющего напряжения мощной проходной электронной лампы предотвращает дуговые процессы в сварочной пушке путем кратковременного прерывания ускоряющего напряжения, не ведущего к нарушению формирования сварных швов.

Система РАСТР (рис. 2), функционирующая на принципах растрового электронного микроскопа, обеспечивает возможность наблюдения в режиме реального времени за ходом сварочного процесса и автоматического совмещения каждого из трех пучков электронов со стыками свариваемых кромок. Четкая картина сварочного процесса отображается на экране монитора и не подвержена влиянию паров свариваемого металла, что характерно для традиционных оптических систем наблюдения.

Установка оснащена системой диагностики пучка электронов, позволяющей оператору:

- определять положение плоскости фокусировки пучка до начала сварки;
- периодически оценивать изменение пространственных и энергетических параметров пучка с целью выявления необходимости смены катода сварочной пушки.

Срок службы гексаборидного катода в виде таблетки не менее 40 ч в режиме сварки при мощности пучка 20 кВт, при этом положение оси пучка не меняется при изменении фокусировки пучка.

Управление с помощью CNC+PLC всеми подсистемами установки.

Компьютерная система сканирования электронного пучка стабилизирует состояние сварочной ванны и улучшает качество формирования лицевой и корневой поверхностей сварного шва.

Тактовое время установки (время выхода сваренного долота) составляет 5 мин (для установки фирмы «Сиакс» аналогичного назначения – 7,5... 8 мин).

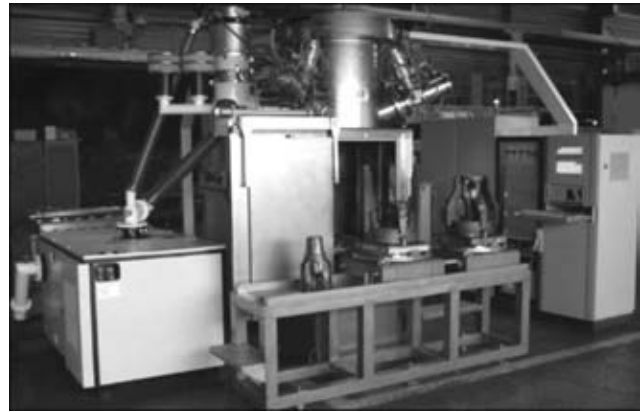


Рис. 1. Внешний вид установки КЛ-117 для ЭЛС буровых долот

Конструкция установки. Вакуумная камера состоит из двух частей. Верхняя камера имеет три патрубка для размещения трех пушек, оснащенных турбомолекулярными насосами. Нижняя камера оснащена механизмом перемещения бурового долота. Этот механизм имеет планшайбу с патроном для сборки трех лап бурового долота. Для загрузки-выгрузки долот нижняя камера имеет переднюю дверь, смещаемую в сторону с помощью сжатого воздуха. Собранный буровый долот подается на позицию сварки с помощью стола, располагаемого слева от нижней камеры. Сваренное долото (рис. 3) выгружается из камеры с помощью другого стола, располагаемого справа от нижней камеры. Система автоматического управления установкой построена на принципах открытой архитектуры. Она включает компьютеры верхнего и нижнего уровней, соединенные между собой через Internet, и обеспечивает следующие возможности:

- однокнопочное управление полным циклом сварки долота, включая откачку вакуумной системы и напуск воздуха в камеру;
- программируемое изменение тока пучка, тока фокусировки, скорости сварки в функции перемещения долота относительно сварочных пушек;
- автоматическая и полуавтоматическая сварка согласно любой из программ, сохраняемых в библиотеке программ;
- основанный на операционной системе Windows NT интерфейс оператора, обеспечивающий возможность задания и корректировки сварочных

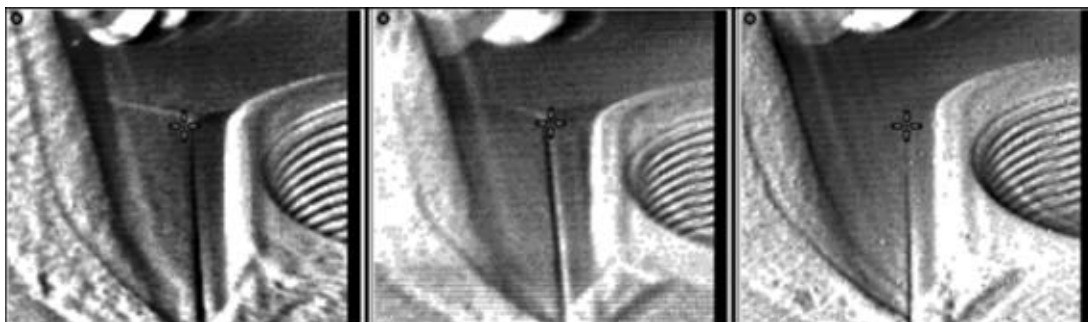


Рис. 2. Фрагменты наблюдения за ходом сварочного процесса с помощью системы РАСТР



Рис. 3. Внешний вид сваренного долота

программ в виде графиков или таблиц для любого профиля бурового долота. Не требуется специальных навыков программирования, оператор фактически обучает систему управления для сварки каждого из типоразмера долот, используя накопленные результаты подборов режима сварки;

- объединение нескольких подпрограмм в одну мастер-программу для сварки каждого из размеров долот;

- автоматический поиск одновременно каждого из трех стыков как в режиме предварительного обучения системы, так и в процессе сварки в режиме реального времени путем электромагнитного отклонения пучков с использованием системы РАСТР. Возможные сварочные деформации не ведут к смещению пучков от плоскости стыков;

- анализ с помощью системы РАСТР качества сборки долота с выдачей команды на запрет сварки в случае недопустимого смещения траектории стыков;

- выполнение ремонтной сварки долота одной пушкой;

- документирование, распечатка результатов сварки в виде паспорта, сохранение всех управляющих команд и использованных сварочных программ в виде таблиц и графиков в течение двух месяцев;

- диагностика состояния подсистем и удаленное управление и диагностика через Интернет

Габаритные размеры установки

(L×W×H), мм	5650×3400×2800
Масса, т	10
Диаметр и высота верхней камеры, мм	Ø580, H = 722
Габаритные размеры нижней камеры (L×W×H), мм	800×650×1275
Общий объем сварочной камеры, м ³	0,87
Рабочий вакуум в камере, мм рт.ст., не хуже чем	5·10 ⁻³
Время получения рабочего вакуума в камере и пушке, мин, макс	2
Скорость перемещения бурового долота, мм/с	1,66...33,3
Длина перемещения долота, мм, макс	740
Угол наклона пушек, град	23
Диаметр планшайбы вращателя, мм	545

Скорость вращения планшайбы, оборот/мин	2
Точность позиционирования планшайбы, дуг/с	±30
Несущая способность вращателя, кг	350

Сварочная аппаратура ЭЛА-60/60 трехпушечная

Ускоряющее напряжение, кВ	60
Нестабильности ускоряющего напряжения, %, макс	±0,5
Диапазон сварочных токов каждой из пушек, мА	1...330
Нестабильности тока пучка, %, макс	±0,5
Частота развертки пучка, Гц, макс	1000
Угол отклонения пучка, град	±3,5
Гарантийный срок службы катода, ч, не менее	40

Допустимая ошибка сборки долота на позиции

сварки, град, макс ±0,5

Точность совмещения пучка со стыком для каждой

из пушек в процессе сварки, мм ±0,1

Общие характеристики:

Установленная мощность, кВ·А, макс	140 (380 В, 50/60 Гц)
Расход охлаждающей воды, л/ч	3130
Температура охлаждающей воды на входе, °С, макс	20
Давление охлаждающей воды, кгс/см ²	3...4
Давление сжатого воздуха, кгс/см ² , мин	6

E-mail: beam@mbox.com.ua

http://paton.kiev.ua/eng/inst/ntkstructure/deplist/571.html

НОВАЯ СТРАТЕГИЯ ДЕЛОРО СТЕЛЛИТ ГРУПП

За последние семь лет значительно возросли продажи присадочных материалов для наплавки и напыления, оборудования и готовых изделий производства группы фирм **Deloro Stellite** на постсоветском пространстве и в первую очередь в России. Это результат совместной творческой работы экспортной команды Делоро Стеллит Групп в Кобленце (Германия), коммерческого, производственного отделов, всех рабочих и сотрудников, а также наших представителей российского партнера **ТС ТЕНА** в Москве (директор С. Л. Бычковский) и фирмы **Грик** в Киеве (директор О. В. Гречаный).

Следуя новой коммерческой и технической стратегии нашей группы фирм, заключающейся в создании сети предприятий Делоро Стеллит во всем мире, **Deloro Stellite Германия** в сотрудничестве с российскими партнерами из Москвы и Перми, в июне 2005 г. организовало десятое предприятие в дополнение к уже существующим в США, Канаде, Великобритании, Германии, Франции, Италии и Китае. Название нового предприя-





тия — **ООО ДС УРАЛ**. В совете директоров нового предприятия интересы **Deloro Stellite Holding GmbH Co. & KG** Кобленц представляет инж. А. Павленко.

В конце 2005 г. предприятие **ДС УРАЛ** начнет свою деятельность в Перми с введения в эксплуатацию оборудования для сверхзвукового напыления, линии газопламенного напыления, плазменно-порошковой наплавки и плазменного напыления.

Численность персонала в начале составит пять работников и будет увеличена в течение пяти лет до сорока. Дальнейшие инвестиции в виде оборудования для напыления и наплавки будут способствовать увеличению годового оборота, который предполагается довести к 2010 г. до 8 млн Евро.

Предприятие **ДС УРАЛ** будет выполнять работы по наплавке напылению суперсплавами на основе кобальта (**СТЕЛЛИТ®**, **ТРИБАЛОЙ®**), на основе никеля (**ДЕЛОРО®** и **НИСТЕЛЛ®**), композиционными агломерированными порошками (металлическая матрица карбиды **ДЖЕТ КОУТ®**), керамическими и другими порошками, деталей для нефтедобывающих, нефтехимических, химических и других предприятий различных отраслей.

СВАРНЫЕ ТИТАНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ МОРСКОГО СУДНА

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины способом электронно-лучевой плавки производятся слитки-слябы из титанового сплава ПТ-3В с гомогенным химическим составом и структурой, из которых на ОАО «Феодосийская судостроительная компания «Море» изготавливаются сварные титановые конструкции крыльевых устройств морских судов толщиной 200...250 мм без разделки сварочных кромок (см. 4-ю с. обложки настоящего номера). Использование слитков-слябов позволило увеличить выход годового металла на 10% и снизить себестоимость на 20 % по сравнению с традиционной технологией.

Кроме того, в области электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью учеными института впервые в мире созданы технологии и оборудование для выплавки слитков из недробленых блоков губчатого титана; получения высококачественных слитков сложнoleгированных титановых сплавов; выплавки полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб, а технология оплавления боковой поверхности слитков успешно применяется вместо их механической обработки.

Цикл научных работ по теме «Разработка физико-металлургических и технологических основ изготовления и обработки титана и сплавов на его основе и их внедрение в промышленность Украины» коллектива авторов в составе Н. П. Тригуба, В. Н. Замкова, С. В. Ахонина, В. В. Тэлина, А. Н. Петрунько, О. М. Ивасишина, С. А. Фирстова, О. А. Жукова, В. А. Трофимова, С. Н. Антонова выдвинут на соискание Государственной премии Украины в области науки и техники 2005 г.



ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Способ изготовления плоских сеток, отличающийся тем, что укладку образующих плоскую сетку предварительно подготовленных прутков осуществляют в кондуктор на рабочем столе оператора, а фиксацию взаимного расположения в нем всех образующих плоскую сетку прутков выполняют после укладки всего комплекта образующих плоскую сетку прутков фиксатором, обеспечивающим прижатие верхних после укладки в кондуктор прутков к нижним в узлах их пересечения, подготовленный таким образом кондуктор снимают с рабочего стола оператора и устанавливают в сварочную машину с передней ее стороны, последовательно выполняют сварку каждого ряда пересечений образующих плоскую сетку прутков, а после завершения сварки плоской сетки кондуктор возвращают в исходное перед сваркой положение, снимают и устанавливают на рабочем столе оператора, развешивают, отводят фиксатор и удаляют из кондуктора сваренную сетку. Патент РФ 2248264. В. А. Коневских, Е. П. Наумерничкий, В. И. Лексиков (ОАО «Машзавод «ЗиО-Подольск») [8].

Устройство для контактной точечной сварки многослойных панелей с гофрированным наполнителем, отличающееся тем, что механизм поджатия состоит из жесткой тяги, привода перемещения жесткой тяги в горизонтальной плоскости, двух разъемных частей, между которыми размещены тела вращения, при этом внутренняя поверхность одной из частей выполнена конусной, а вторая — ступенчатой и связана жесткой тягой с приводом ее перемещения в горизонтальной плоскости. Патент РФ 2248265. В. А. Тарасов (ФГУП «НИИАСПК») [8].

Способ формирования микрорельефа поверхности изделий, отличающийся тем, что сконцентрированным потоком излучения формируют в заданном месте заготовки зону расплава заданных размеров и конфигурации, которую перемещают в заданную точку заготовки, управляя параметрами термовоздействия в процессе перемещения сконцентрированного потока излучения, и подвергают ее затвердеванию, прекращая действие излучения. Патент РФ 2248266. Н. И. Каргин, В. М. Якушев, А. В. Якушев (Северо-Кавказский ГТУ) [8].

Источник питания для дуговой сварки, отличающийся тем, что он снабжен дросселем, двумя конденсаторами и датчиком тока, а катушка индуктивности и ее дополнительная обмотка выполнены в виде отдельного трансформатора, в котором катушка индуктивности является первичной обмоткой, а дополнительная обмотка — вторичной обмоткой, при этом дроссель включен последовательно первичной обмотке сварочного трансформатора, один из введенных конденсаторов — параллельно тиристорам и первичной обмотке сварочного трансформатора, вторичная обмотка отдельного трансформатора и последовательно подсоединенный к ней другой введенный конденсатор включены параллельно вторичной обмотке сварочного трансформатора, а в цепь вторичной обмотки сварочного трансформатора последовательно включен датчик тока, выход которого соединен с блоком управления тиристорами. Патент 2248865. С. В. Кашин, Д. В. Перковец [9].

Порошковый питатель, отличающийся тем, что бункер состоит из соосно расположенных внешнего и внутреннего контейнеров с основаниями в виде конусов с возможностью вертикального перемещения внутреннего контейнера относительно внешнего, при этом бункер связан через втулку с заслонкой с дозирующим узлом, снабженным двигателем и ведущим роликом, причем смеситель выполнен с возможностью вращения и расположен под углом 45...60° к горизонтальной плоскости. Патент РФ 2248866. Т. Г. Чернова, В. М. Неровный [9].

Способ определения глубины проплавления при лазерной сварке прецизионных изделий, отличающийся тем, что для имитации процесса сварки используют образец-имитатор со ступенчатым профилем нижней ограничивающей поверхности со стороны корневой части сварного шва, при этом сварной шов выполняют непрерывным и при фиксированных энергетических параметрах термического цикла для всех участков со ступенчатым профилем на нижней ограничивающей поверхности формируют в определенной последовательности рисунок следа корневой части сварного шва в виде «дорожки» из касающихся и частично перекрывающихся друг друга концентрических кругов литой зоны и перекрывающихся друг друга зон термического влияния на первом участке, в виде «дорожки» из отдельных не касающихся друг друга концентрических кругов литой зоны и касающихся и частично перекрывающихся друг друга зон термического влияния на втором участке, в виде отдельных не касающихся друг друга следов зон термического влияния на третьем участке, а глубину проплавления оценивают визуально по характеру изменения рисунка следа корневой части сварного шва на нижней ограничивающей поверхности со ступенчатым профилем. Патент РФ 2248867. В. А. Гребенников, А. А. Ефанов, И. Г. Мищенко и др. [9].

Неплавящийся электрод для дуговых процессов на обратной полярности, отличающийся тем, что дно стакана предварительно обработано ударным методом или давлением 50...60 кгс/см², при этом на дне стакана выполнена внутренняя пуклевка, водоохлаждаемая трубка установлена с зазором относительно дна стакана для обеспечения прохода охлаждающей жидкости, а геометрические размеры стакана выбраны из следующих соотношений: $D = m\sqrt{I}$, $S = 0,33D$ и $S_1 = 0,24D$, где D — наружный диаметр стакана; I — максимальный ток сварки; m — эмпирический коэффициент, равный 0,38; S — толщина дна стакана; S_1 — толщина стенки стакана. Патент РФ 2248868. В. П. Бочкарев, В. Д. Горбач, В. К. Назарук (ФГУП ЦНИИТС) [9].

Электрод для сварки высоколегированных и разнородных сталей, отличающийся тем, что стержень выполнен из аустенитной стали, а покрытие дополнительно содержит ферромарганец или марганец, ферросилиций и железо при следующем соотношении компонентов, мас. %: 10...28 мрамора; 6...15 ферромарганца или марганца; 1...9 ферросилиция; 5...20 феррохрома или хрома; 3...12 магнезита; 2...10 железного порошка; остальное диоксид титана. Патент РФ 2248869. И. Н. Ворновицкий (ЗАО «Электрод») [9].

Устройство для сварки переменным током, отличающееся тем, что вход импульсного генератора подсоединен к первичной обмотке однофазного сварочного трансформатора, а диод подсоединен между вторым выводом вторичной обмотки повышающего трансформатора и вторым выводом разрядного конденсатора. Патент РФ 2249497. Е. Н. Михеева, В. И. Воронин (ОАО «АО Спецэлектрод») [10].

Минеральный сплав для покрытий сварочных электродов и керамических флюсов, отличающийся тем, что компоненты минерального сплава взяты в следующем соотношении, мас. %: 45,0...51,0 оксида алюминия; 13,0...17,0 оксида кремния; 3,0...7,0 диоксида титана; 10,0...16,0 оксида кальция; 16,0...22,0 фторида кальция. Патент РФ 2249498. В. А. Малышевская, Ю. Д. Брусницын, А. Н. Абрамушин и др. [10].

Способ соединения металлических деталей, отличающийся тем, что в качестве промежуточного металла используют легкоиспаряющийся металл, вызывающий размягчение поверхностей соединения, после его размещения в местах соединения деталей осуществляют выдержку в течение времени, достаточного для размягчения металла деталей в месте их соединения,

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене РФ «Изобретения. Полезные модели» за 2005 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



нагревают детали до полного испарения промежуточного металла и затем охлаждают до комнатной температуры. Патент РФ 2250156. Г. Г. Пятых [11].

Способ сварки плавящимся электродом металлов в смесях газов на основе аргона, отличающийся тем, что величину силы критического сварочного тока определяют с учетом теплофизических свойств металла электрода и его размеров — диаметра и вылета, по выражению

$$I_{кр} = \sqrt{e^{x_1} \left(\frac{\pi d_э^2}{4\gamma} \right)^{x_2} \frac{\sigma^{x_3}}{\rho L_э^{x_4} H^{x_5}} \pm 5},$$

где $I_{кр}$ — сила критического сварочного тока; A, γ — плотность металла электрода, г/м³; ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·м; $L_э$ — вылет электрода, м; $d_э$ — диаметр электрода, м; H — скрытая теплота плавления, Дж/кг; σ — поверхностное натяжение, Н/м. Патент РФ 2250157. А. С. Бабкин (Липецкий ГТУ) [11].

Устройство управления сварочным током при многопроходной сварке, содержащее источник питания дуги, сварочную горелку, датчик напряжения, первый усилитель с переменным коэффициентом усиления, первый, второй, третий, четвертый выпрямители, первый, второй, третий, четвертый сглаживающие фильтры, первый блок аналоговой памяти, первый сумматор. Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2250811. В. М. Понарин, Н. И. Воронцов, Н. В. Воронцова и др. (Тульский ГТУ) [12].

Полуавтомат для упрочнения индукционной наплавкой, отличающийся тем, что он содержит дополнительно бункер с наплавочной шихтой, снабженный дозатором с заслонкой, взаимодействующей поочередно с соответствующим ложементом, механизм возвратно-поступательного перемещения поворотного стола содержит жестко установленный на вертикальной оси диск, снабженный по периметру опорными роликами по числу позиций ложементов, при вращении поворотного стола взаимодействующими с копирами, жестко закрепленными на раме, выполненными в виде пластин, каждая из которых имеет наклонные поверхности с двух сторон для подъема и опускания вертикальной оси, по периметру поверхности диска поворотного стола жестко закреплены попарно флажки по числу позиций ложементов, выполненные в виде изогнутых пластин, взаимодействующих поочередно при вращении стола с двумя конечными выключателями начала и конца наплавки, закрепленных на раме, а электропривод вращения выполнен двухскоростным с возможностью подвода изделия на позицию наплавки с одновременной насышкой шихты и регулирования рабочей скорости при наплавке. Патент РФ 2250812. Ю. А. Зайченко, А. Н. Демин, А. А. Гариков, В. В. Косаревский (ФГУП ИЦ «Сплав» МПС) [12].

Флюс на основе фторалюмината щелочного металла для пайки алюминия или алюминиевых сплавов, пригодный для нанесения в сухом состоянии, характеризующийся тем, что он имеет гранулометрический состав с суммарным объемным распределением частиц по их крупности, расположенным в ос-

новном в пределах, ограниченных представленными на рисунке кривыми 1 и 2. Патент РФ 2250813. Х.-В. Свидерски, А. Оттманн, Х.-Й. Бельт (Зольвай Флуор инд Дериватс ГмбХ, Германия) [12].

Способ зажигания и горения дуги постоянного тока, при котором зажигают дугу между неплавящимся электродом и металлом с индуктивностью в сварочной цепи посредством разряда конденсаторов, отличающийся тем, что зажигание дуги осуществляется неплавящимся электродом диаметром 0,5...6 мм на токе 0,3...5 А с индуктивностью сварочной цепи 6...8 мкГ и разрядом конденсаторов емкостью 1000...2000 мкФ. Патент РФ 2251473. Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер (Красноярский ГТУ) [13].

Устройство автоматического управления положением сварочной головки, отличающееся тем, что в устройство введены первый и второй инверторы, выпрямитель, второй сумматор, второй усилитель, привод подачи сварочной головки вдоль стыка, датчик опорного напряжения, причем выпрямитель, второй инвертор, второй сумматор, второй усилитель и привод подачи сварочной головки вдоль стыка соединены последовательно, ко второму входу второго сумматора подключен датчик опорного напряжения, вход выпрямителя подключен к выходу первого сумматора, а вход первого инвертора подключен к выходу триггера Шмидта, а выход — к аналоговому ключу. Патент РФ 2251474. Р. В. Соколовский, М. А. Корниенко, В. М. Понарин и др. (Тульский ГТУ) [13].

Устройство для непрерывного изготовления плоских сеток, отличающееся тем, что механизм поштучной подачи поперечной проволоки содержит узлы питателя для поштучного отделения проволоки и магнитный ловитель для удержания и ориентирования поперечной проволоки, жестко установленные на основании по разные стороны от нижних электродов, при этом питатель содержит бункер для поперечных проволок, который соединен с входом цельсообразного направляющего канала, у выхода последнего установлен отсекающий проволоки в виде шибера, соединенный с пневмоцилиндром, а магнитный ловитель выполнен в виде магнитных блоков, закрепленных в пазах на общем кронштейне, причем каждый магнитный блок содержит постоянный магнит, противоположные грани которого охвачены магнитопроводом, а полюса магнитопровода выполнены в виде пластин, вертикальные торцовые поверхности которых установлены в один ряд на линии сварки и размещены между нижними электродами. Патент РФ 2251475. А. Б. Белов, Ю. Г. Дузенко, К. Д. Журавлев, А. К. Хвощевский [13].

Способ восстановления лопаток паровых турбин, включающий удаление защитных накладок и изношенного участка лопатки, многослойную наплавку восстанавливаемого участка, механическую обработку лопатки, приварку защитных накладок и термическую обработку, отличающийся тем, что наплавку производят в импульсном режиме металлом более пластичным, чем материал лопатки, а приварку защитных накладок производят двумя швами, один из которых накладывают на основной материал лопатки, а другой — на наплавленный металл. Патент РФ 2251476. А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, Г. В. Годовская и др. (ООО НПО «Уралавиапедтехнология») [13].



2-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ»

23-28 мая в Кацивели на базе Дома творчества ученых НАНУ состоялась 2-я Международная конференция «Laser Technologies in Welding and Material Processing-LTVMP-05», организованная ИЭС им Е. О. Патона НАНУ и НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ».

Еще на 1-й конференции, успешно прошедшей в мае 2003 г., было принято решение о проведении подобных международных конференций раз в два года. И вот снова в 2005 г. специалисты из Украины, России, Белоруссии, США, Германии, КНР, Польши, Швейцарии, Израиля, Бельгии, Ирана, Турции и Сирии в области лазерной технологии собрались для обсуждения последних результатов своих исследований. Следует отметить, что после украинской самыми многочисленными были делегации из Германии, России и Польши.

В последние годы лазеры динамично вошли практически во все сферы человеческой деятельности. Сейчас насчитывается более 350 различных применений лазеров. Глобальный рынок лазеров и лазерных технологий составляет более 90 млрд дол. США в год (без учета военных применений). Особенно эффективно использование лазеров для обработки материалов в различных отраслях промышленности. Причем интерес производителей к этим технологиям особенно возрос в последние десятилетия в связи с появлением новых поколений лазеров, отличающихся повышенным коэффициентом полезного действия — твердотельных лазеров с диодной накачкой, мощных СО₂-лазеров, эксимерных лазеров, лазеров на парах металлов, компактных диодных лазеров, оптоволоконных лазеров и др. Этим и другим вопросам в области лазерной технологии был посвящен программный доклад «Лазерная технология: от макро до нано» сопредседателя конференции проф. В. С. Коваленко. Он прозвучал после великолепной музыкальной паузы в исполнении ансамбля

скрипачей Крымского государственного инженерно-педагогического университета (ректор, проф. Ф. Якубов член Оргкомитета конференции).

Большой интерес участников вызвал пленарный доклад д-ра Ф. Бахмана, вице-президента фирмы «Рофин-Синар» (Германия), посвященный проблемам использования диодных лазеров для накачки твердотельных лазеров и обработки материалов. Проф. Г. Туричин (Государственный технический университет Санкт-Петербурга, Россия) рассказал о результатах исследования кинетики оптического разряда в плазменном облаке при лазерной сварке в защитном газе.

В пленарном докладе проф. Х. Мана из Гонконгского политехнического университета рассмотрены возможности лазерного нанесения пористых покрытий NiTi на специальные сплавы, обладающие памятью формы, используемые в хирургии.

Известный специалист в области теории лазерной обработки проф. В. С. Голубев (зам. директора Института лазерных и информационных технологий РАН, Москва, Россия) представил глубокий анализ аэродинамических и гидродинамических явлений при газолазерной резке материалов.

Среди пленарных докладов также особо следует отметить доклад руководителей Лазерного центра Института Фраунгофера (Аахен, Германия) д-ра Е. В. Кройца и д-ра Р. Попрэйва «Новые возможности использования излучения твердотельных лазеров».

Всего было проведено три пленарные сессии.

Дальнейшая работа конференции проходила по тематическим направлениям: сварка, моделирование, синтез трехмерных объектов (быстрое прототипирование), термообработка, покрытия, оборудование и другие прогрессивные процессы лазерной обработки материалов (все-

го 8 сессий). Специальная сессия была отведена для стеновых докладов (всего 24 доклада).

Среди сессионных докладов обращает внимание возросший интерес к численным методам исследования, моделированию процессов, анализу физических явлений при взаимодействии лазерного излучения с материалом. Очевидно, что очень сложные процессы лазерной обработки материалов одними экспериментальными методами исследования без моделирования для выбора оптимальных условий осуществить было бы очень дорого. Поэтому все шире в разработке реальных производственных процессов используются информационные





технологии. Так, специалисты Бременского института лазерных технологий (Германия) д-р Т. Преториус, проф. Ф. Воллертсен представили свои теоретические результаты изучения возможностей использования лазерного излучения для программируемого деформирования листового материала. В совместном докладе канд. техн. наук О. В. Махненко (ИЭС им. Патона, Украина) и д-ра П. Зайффарта (SLV, Росток, Германия) представлены расчетные уровни деформаций балки при лазерной сварке. Анализ существующих моделей аэродинамических явлений при газолазерной резке металлов был посвящен доклад Р. Жука и В. Коваленко (НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ», Украина). Сотрудники ИЭС им. Патона НАНУ д-ра И. А. Кривцун и А.И. Бушма рассмотрели физические явления взаимодействия лазерного излучения с мелкодисперсными материалами при лазерном и гибридном лазерно-плазменном напылении.

Гибридные лазерные процессы, находящиеся в центре внимания многих специалистов из различных стран, позволяют существенно повысить эффективность лазерной обработки, улучшить ее качество. Анализ фундаментальных исследований в области гибридной лазерной сварки сделан в докладе бременских специалистов С. Томми и Ф. Воллертсена (Германия) и И. Кривцуна, В. Шелягина (ИЭС им. Е. О. Патона) и др. Гибридной лазерной сварке алюминиевых сплавов посвящен доклад Д. Гедобта (Фламандский институт технологических исследований, Лазерный центр, Бельгия).

Гибридным лазерно-дуговым и лазерно-микроплазменным процессам сварки, поверхностной обработке, нанесению покрытий были посвящены материалы специалистов ИЭС им. Патона НАНУ кандидатов техн. наук В. Шелягина, В. Хаскина и др.

Ряд докладов был посвящен актуальным вопросам лазерного спекания порошковых материалов при реализации процессов синтеза трехмерных изделий — Н. Анякина, К. Рудакова и др. (НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ»), Ю. Чивеля с сотрудниками (Концерн порошковой металлургии, Минск, Беларусь) и др. Исследование возможностей использования лазерного излучения для спекания алмазосодержащих композитов при изготовлении алмазного режущего инструмента рассматривалось в общем докладе исследователей двух организаций: НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ» (В. Коваленко, Л. Головки, А. Гончарук) и Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ (Н. Новиков, А. Шепелев, В. Сороченко).

Не совсем обычный доклад был представлен сотрудниками Аргонской национальной лаборатории (США) (А. Ковальченко, О. Арай) и фирмы «Технион», Хайфа, Израиль (И. Этсион). Они изучили трибологические свойства в условиях жидкой смазывающей среды металлических поверхностей, подвергнутых лазерному текстурированию, и на основании результатов предложили оптимальные условия текстурирования поверхности.

Вызвал интерес и заключительный доклад конференции «Использование web-технологий для повышения эффективности эксплуатации лазерного технологического оборудования» (В. Колпаков, В. Коваленко, НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ» и А. Мамалис, Национальный технический университет Афин, Греция). В докладе показаны основные принципы работы виртуального предприятия, использующего в качестве производственной базы лазерное технологическое оборудование различных организаций для выполнения заказов по лазерной обработке с применением современных информационных систем и интернета.

Конференция показала, что лазерная технология по-прежнему остается динамично развивающейся областью науки и техники, стабильно повышающей эффективность существующих процессов лазерной обработки и постоянно открывающей новые применения лазеров в производственной сфере.

Рабочим языком конференции был английский, хотя в отдельных случаях прибегали к дистанционному синхронному переводу, предоставленному Укртелекомом.

Успешному проведению конференции способствовала слаженная работа Оргкомитета под руководством канд. физ.-мат. наук А. Т. Зельниченко.

К открытию конференции были выпущены сборник тезисов и программа конференции (на английском языке). В конце октября — начале ноября 2005 г. будут изданы труды конференции на английском языке. Заказать сборник трудов можно в редакции журнала «Автоматическая сварка».

Доброжелательная, гостеприимная, творческая обстановка конференции способствовала развитию полезных дискуссий, установлению деловых контактов. Участники конференции из разных стран, отметив ее безусловный успех, выразили пожелание принять участие в следующей, 3-й конференции LTWMP-07 в 2007 г.

В. С. Коваленко, д-р техн. наук

ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ В ОАО «ХАРЦЫЗСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД»

24–27 мая 2005 г. ОАО «Харцызский трубный завод» провело в Ялте Пятую международную научно-техническую конференцию, посвященную перспективам развития технологии производства сварных труб большого диаметра. Основная тема конференции была раскрыта в 27-ми докладах ученых, работающих в области металлургического и трубного производства, ведущих специалистов предприятия, представителей организаций и фирм, являющихся смежниками ОАО ХТЗ, — поставщиков технологических материалов и оборудования, потребителей продукции.

Участие в работе конференции коллег и партнеров не только из Украины, но и из ближнего и дальнего зарубежья свидетельствует о значимости и востребованности продукции ОАО ХТЗ как на внутреннем, так и внешнем рынке. Российских потребителей и российскую науку представляли такие организации и институты, как ОАО «Газпром», ООО «Институт ВНИИСТ» (г. Москва), ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина (г. Москва), ОАО «Гипрогазцентр» (г. Нижний Новгород), США — фирма «EWI Microalloying Int.», Германию — фирма «Niobium Products Company», Швейцарию — фирма «Haeusler AG». Наиболее представительным на конференции был отряд ученых и специалистов, работающих на предприятиях, в научно-исследовательских и проектных институтах, являющихся гордостью отечественной науки, металлургического и трубного производства: ИЭС им. Е. О. Патона (г. Киев), ГНИИ трубной промышленности (г. Днепропетровск), МНЦ ВНИИ-ТЕСТ (г. Днепропетровск), «ЮжНИИгипрогаз» (г. Донецк), УкргосНИИпластмасс (г. Донецк), ОАО Укртрубопром (г. Днепропетровск), ОАО МК Азовсталь (г. Мариуполь).

Состояние, проблемы, задачи и перспективы отечественного трубного производства в целом, и ОАО Харцызский трубный завод в частности накануне вступления Ук-



раины во Всемирную торговую организацию прежде всего обсуждались в техническом и экономическом аспектах.

Выступающие отметили, что завод качественно меняется на глазах. То, о чем раньше говорилось как о смелых проектах, стало реальностью и даже обыденностью. На технологической линии по производству одношовных труб, полностью загруженной и обеспеченной заказами, уже изготовлено более одной четверти миллиона тонн труб. Сейчас решаются вопросы модернизации одношовного производства — изменения формы разделки кромок, улучшения формы трубной заготовки, уменьшения концевой обрезки и т.д. Двухшовный поток выпускает не опытные, а промышленные партии труб диаметром 1220×1420 мм с толщинами стенок до 27 мм из высокопрочных сталей X70 и X80. До этого ни один из трубных заводов на территории СНГ такие трубы не производил. Они закупались в Японии, Германии и других странах дальнего зарубежья.

Освоена четырехдуговая сварка труб под слоем керамического флюса, в производстве используются разнообразные системы полимерных материалов для нанесения антикоррозионных покрытий, внедряются ресурсосберегающие технологии.





Проведено значительное техническое перевооружение завода: приобретено самое современное оборудование для неразрушающего контроля, новое сварочное оборудование, дробеметы, индукционная печь, экструзионное оборудование, выполняются крупные мероприятия по автоматизации и мониторингу производства, закупается перспективное испытательное и исследовательское оборудование. Начата реализация масштабного проекта по созданию линии одношовного производства с еще большим диапазоном диаметров и толщин стенок труб, чем на существующей линии. Поставщиком оборудования после проведения открытого тендера стал один из мировых лидеров в производстве подобного оборудования — компания «Haeusler AG», Швейцария.

Нынешнее состояние дел в ОАО «ХТЗ» и в трубной промышленности Украины в целом оценено участниками конференции весьма оптимистично: строятся новые трубопроводные системы, ремонтируются и модернизируются имеющиеся, наращиваются объемы добычи и использования природного газа и нефти. Все это обеспечивает украинских трубников работой. Загруженность ОАО ХТЗ возросла за последние годы в несколько раз. При этом осваивается производство продукции, пользующейся спросом на рынке труб, выполняются ответственные зарубежные заказы. Если раньше в дальнее зарубежье поставлялись трубы для металлоконструкций и водоводов (категории прочности Grade B / X42), то теперь Харьковский трубный завод регулярно отправляет десятки и сотни километров труб категорий X60 и X70 для магистральных газо- и нефтепроводов в Казахстан, Иран, Сирию, Туркменистан, Египет, США, Восточную Европу, Китай и другие страны. До 2005 г. единственным рынком сбыта двухшовных харьцызских труб были страны, образовавшиеся при распаде Советского Союза. Теперь начато освоение нового потенциально огромного рынка труб большого диаметра — иранского. В роли заказчика выступает иранская национальная газовая компания «NIGC».

И все-таки крупнейшим российским заказчиком двухшовных харьцызских труб был и остается ОАО «Газпром». Производство ОАО ХТЗ было создано именно для Газпрома и продолжает оставаться востребованным, несмотря на политические и экономические катаклизмы последних лет. Исчезают старые и возникают новые государства, меняются правительства, а харьцызские трубы продолжают использоваться и закупаться для перекачки россий-

ского газа. В самой России, на отечественных трубных заводах реализуются масштабные технические проекты, декларируется готовность отказаться от наших труб, но статистика пока говорит сама за себя. В марте этого года ТЭСЦ-2 ОАО ХТЗ изготовил 20-ти миллионную тонну труб со времени своего ввода в эксплуатацию. Подавляющая часть этих труб ушла на Газпром.

Самые теплые слова на конференции были сказаны руководителем предприятия в адрес смежников и коллег, работающих совместно со специалистами завода над проблемами производства и надежности газонефтепроводных труб. Прежде всего, о потребителях — ОАО «Газпром», НАК «Нефтегаз Украины», АТЗТ «Газбудинвест», ОАО «АК «Транснефть», ЗАО «Зарубежнефтегаз», ООО «Казахстанско-Китайский трубопровод», Национальной иранской газовой компании «NIGC», ДАО «Черноморнефтегаз» и др.

Была подчеркнута особая роль науки в развитии и сегодняшних успехах предприятия — ведущих научно-исследовательских и проектных институтов Украины и России: ИЭС им. Е. О. Патона, Государственного трубного института им. Я. Е. Осады, ВНИТИ-ТЕСТ, ВНИИГАЗ, ВНИИСТ, ЦНИИЧЕРМЕТ им. И. П. Бардина ЮжНИИгипрогаз, Института транспорта нефти, ВНИПИТРАНСГАЗ, УКРГАЗПРОЕКТ, ГИПРОспецГАЗ, ГИПРОГАЗЦЕНТР, ГАЗНИИПРОЕКТ, УкрГосНИИпластмасс, УКРГИПРОМЕЗ и др.

Надежными деловыми партнерами Харьцкого трубного выступают металлургические комбинаты — производители листовой стали: МК «Азовсталь», МК им. Ильича, Алчевский металлургический комбинат — именно они помогли заводу стать современным, высокотехнологичным предприятием, именно с их помощью и участием успешно он работает на традиционных рынках и осваивает новые.

На конференции с докладами выступили зав. отделами ИЭС им. Е. О. Патона канд. техн. наук А. А. Рыбаков и д-р техн. наук В. А. Троицкий.

По результатам конференции техническими службами Харьцкого трубного завода разработана специальная программа по реализации рекомендаций науки с учетом новых требований к продукции потребителей.

Я. В. Бережняк, инж.

УДК 621.791.009(100)

III МОЛОДЕЖНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

25–27 мая 2005 г. по инициативе Совета научной молодежи ИЭС им. Е. О. Патона в пгт Ворзель состоялась III Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии». Уже стало доброй традицией раз в два года, в конце весны, проводить сбор лучших представителей научной молодежи Украины в области сварки на базе кардиологического санатория «Ворзель». В этом году было

заявлено 112 докладов молодых ученых и специалистов (в том числе 69 от сотрудников ИЭС), которые представляли 18 научных, учебных организаций и предприятий из 12 городов. Впервые среди участников были представители России из Московского института стали и сплавов. Непосредственное участие в работе конференции приняли около 80 человек.



Открыл конференцию академик НАН Украины Л. М. Лобанов. В своей вступительной речи он отметил важность и актуальность проведения таких конференций, необходимость привлечения молодых кадров в науку и развитие их творческого и интеллектуального потенциала.

Представленные на конференции доклады охватывали следующие направления: прогрессивные технологии сварки и соединения материалов; прочность, надежность и долговечность сварных конструкций; технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхностей; процессы спецэлектрометаллургии; новые конструкционные материалы; математическое моделирование в сварке; автоматизацию процессов сварки и родственных технологий; фундаментальные исследования физико-химических процессов.

Конференция проходила три дня в режиме пленарных заседаний. В ходе ее работы заслушано 75 докладов, зна-

чительная часть которых была подготовлена на высоком научном и техническом уровне. Представление большинства докладов (более 80 %) выполнено с использованием компьютерной техники на мультимедийном проекторе. Прочий иллюстративный материал был представлен на прозрачных пленках как в черно-белом, так и в цветном виде. В целом можно отметить значительный рост научного и демонстрационного уровня этой конференции по сравнению с предыдущими.

На конференции впервые были представлены доклады на английском языке. Особенно приятно отметить, что это были представители ИЭС им. Е. О. Патона. Надеемся, что в дальнейшем количество докладов на иностранных языках будет увеличиваться.

Хотелось бы отметить выступления представителей из НТУУ «КПИ», Украинской инженерно-педагогической академии, а также традиционно сильные работы из Черниговского ГТУ, Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова, ФТИМСа.

По окончании конференции состоялось вручение премий победителям. Существенно возросший уровень представленных докладов обусловил решение оргкомитета увеличить количество призовых мест. Авторы лучших докладов были награждены дипломами и денежными премиями. Спонсорскую помощь на премирование оказал НТК «ИЭС им. Е. О. Патона».

Диплом I степени был вручен С. Г. Войнаровичу (ИЭС им. Е. О. Патона) «Микроплазменное напыление покрытия из оксида циркония», дипломы II степени — В. В. Савицкому (ИЭС им. Е. О. Патона) «Определение остаточных напряжений на основе использования методов конечных элементов и электронной спекл-интерферометрии», И. А. Прибытько (Черниговский ГТУ) «Проектирование сварных узлов датчиков давления», дипломы III степени — Е. К. Кузмич-Янчуку (ИЭС им. Е. О. Патона) «Suspension plasma spraying of bioceramic coatings»; Е. В. Половецкому (ИЭС им. Е. О. Патона) «Закономерности формирования структуры соединений титана со сталью, полученных сваркой взрывом»; А. В. Лабарткаве (Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова) «Влияние дефектов на напряженно-деформированное состояние паяных соединений из разнородных материалов»; Д. Д. Кункину (ИЭС им. Е. О. Патона) «Резонансное джерело для зварювання модульованим струмом».

Институт электросварки им. Е. О. Патона приложил все усилия, чтобы конференция прошла на высоком организационном и научно-техническом уровне. К открытию конференции был издан сборник трудов и программа работы.

Большую помощь в проведении конференции оказали С. Н. Степанюк, С. Г. Григоренко, С. Г. Войнарович, В. Е. Федорчук, А. Б. Лесной, В. В. Савицкий, А. В. Лавренюк, а также ученый секретарь ИЭС им. Е. О. Патона д-р техн. наук Л. С. Киреев и директор Технопарка «ИЭС им. Е. О. Патона» А. А. Мазур.

Хотелось бы также выразить благодарность персоналу санатория «Ворзель». Отличные условия проживания и благоустроенная территория санатория способствовали не только плодотворной работе, но и полноценному отдыху участников конференции.

С. Г. Войнарович, инж.



ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР НА КАХОВСКОМ ЗАВОДЕ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

8 июня 2005 г. на ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования» (КЗЭСО) состоялся уже традиционный семинар «Железнодорожный транспорт — Сварка 2005». В нем приняли участие около 30 специалистов из Украины, России и Белоруссии. Они представляли электровозо- и вагоностроительные предприятия (г. Новоалтайск, Кременчуг, Луганск, Стаханов), вагоно- и локомотивные заводы (г. Минск, Львов, Полтава), стрелочный завод (г. Керчь), машиностроительные предприятия (г. Днепропетровск, Мариуполь, Московскую железную дорогу, Киевметрострой). Среди участников были также руководители Общества сварщиков Украины, представители НТК «ИЭС им. Е. О. Патона», Международной ассоциации «Сварка», журналов «Автоматическая сварка» и «Сварщик», Национального университета кораблестроения, Луганского аттестационного центра. От КЗЭСО в работе семинара приняли участие руководители и главные специалисты технических служб.

Цель семинара — более близкое ознакомление потенциальных потребителей с продукцией завода, организацией и культурой производства, технической политикой предприятия по совершенствованию выпускаемой техники, учет пожеланий и анализ возможных замечаний со стороны потребителей, достижение доверительных взаимоотношений на перспективу.

Открыв семинар, директор ОАО «КЗЭСО» Я. И. Микитин дал краткую историческую справку об основании завода и его развитии. Более подробно он остановился на особенностях деятельности завода в последние годы.

Сегодня номенклатура выпускаемой продукции насчитывает свыше 60 наименований. Условно их можно отнести по специфике применения к трем типам:

специальная сварка. Продукция включает машины и комплексы для сварки рельсов, труб, стрелочных переводов и др.;

универсальная сварка. Около 40 наименований продукции включают трансформаторы и выпрямители (120...1600 А), полуавтоматы для сварки в защитных газах (140...630 А), оборудование для ванной сварки арматуры, аппараты для ЭШС, автоматы для сварки под флюсом и в защитной среде, машина для контактной сварки прессового типа (клещи, стационарные машины на токи 1000...40000 А), шовные машины;

электромастные радиаторы (объем выпуска достиг 70 тыс. в год).



Завод на современном этапе динамично развивается. Объемы производства КЗЭСО в 2004 г. превысили вдвое объемы, достигнутые в 1980-е годы. Обеспечивается загруженность его мощностей. Уделяется постоянное внимание повышению профессионального уровня работников завода. Идеология конструирования новых образцов оборудования и совершенствования выпускаемого базируется на тесном сотрудничестве с заказчиками. Именно эта связь определяет баланс в ценовой политике и уровне качества продукции.

Девиз работы предприятия — техническая новизна, качество, сервис («мы стремимся превзойти Ваши ожидания»).

Далее Я. И. Микитин поделился положительным опытом работы с крупными заказчиками (Азовмаш, «Океан», Крюковским вагоностроительным заводом). Эти предприятия на сегодня в значительной мере укомплектованы





оборудованием КЗЭСО. В целом продукция на экспорт в денежном исчислении достигает 70 %.

Растет интерес зарубежных фирм к продукции КЗЭСО. Возросло количество делегаций, посещающих завод.

Вскоре будет подписано соглашение о сотрудничестве на пять лет с КНР.

Что касается железных дорог, то пока нет единой политики в этом ведомстве по организации ремонтно-восстановительных работ, что затрудняет взаимодействие с его ремонтными предприятиями.

На семинаре от КЗЭСО также выступили главный конструктор С. В. Дух, ведущий конструктор Н. И. Постолатий, которые ознакомили участников семинара с конструкторскими решениями, заложенными предприятием при создании новых образцов сварочной техники.

Затем была совершена экскурсия по основным производственным цехам и участкам КЗЭСО, в ходе которой состоялся оживленный обмен мнениями о достоинствах выпускаемого оборудования и, прежде всего, надежности, высказан ряд пожеланий по его совершенствованию.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

УДК 621.791.044(100)

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ»

14–17 июня 2005 г. в Минске (Республика Беларусь) состоялись международная научно-техническая конференция «Современные технологии металлообработки» и белорусско-украинский научный-технический семинар «Неразъемные соединения перспективных материалов: теория и практика». Конференция и семинар были организованы Национальной академией наук Беларуси, Государственным комитетом по науке и технологиям Республики Беларусь, ГНУ «Физико-технический институт» (Минск). В этих мероприятиях приняли участие ученые и специалисты из Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Польши, Казахстана, Республики Корея, Китая, Индии, Бразилии, — всего более 100 человек.

На конференции и семинаре обсуждались результаты исследований в области создания различных высокоэнергетических технологий (лазерных, электронно-лучевых, электроэрозионных), технологий и оборудования обработки металлов давлением (импульсная штамповка и формовка листовых металлов, клиновья прокатка, волочение и ультразвуковая обработка), упрочнение обрабатываемого инструмента наноконпозиционными алмазоподобными покрытиями, новые перспективные материалы электронной техники, материаловедение конструкционных материалов, специальные виды литья, термообработки и механической обработки, ремонт и восстановление деталей и узлов машин и механизмов. Всего было представлено более 90 докладов. Все они опубликованы в сборнике, изданном к открытию конференции.

Как весьма положительный фактор следует отметить, что большинство представленных результатов исследований уже имеют практическое применение в различных отраслях промышленности. В то же время ряд докладов был посвящен более глубокому изучению физических яв-

лений в твердых телах при технологических процессах и разработке альтернативных подходов к созданию новых технологий, материалов и технологического оборудования. Наибольшее количество докладов было посвящено инженерии поверхностей, а именно технологиям упрочнения и нанесения покрытий.

Упрочнение поверхности алмазоподобными наноструктурными покрытиями было рассмотрено в докладе Э. И. Точицкого (НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института, Минск), в котором представлены новая технология импульсного плазменного осаждения, новый высокопроизводительный катодно-дуговой источник плазмы с точностью задания толщины покрытия + 5 нм и новый абразивный материал для прецизионных покрытий. Показано, что углеродные алмазоподобные покрытия очень эффективны для обрабатываемого измерительного инструмента, деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей, медицинских изделий, головок термопечати, молдинговых форм при изготовлении изделий из пластмасс.

Многолетний успешный опыт применения и развития технологий индукционного нагрева для обработки деталей автомобилей (зубчатые колеса, детали сложной формы, протяженные до 6 м детали, стальная дробь) дан в докладе А. И. Михлюка (Минский автомобильный завод).

А. Г. Князева (Институт физики прочности и материаловедения, Томск) представила результаты исследований метода нанесения сверхтвердых наноконпозиционных (TiN/Cu) покрытий на аустенитные стали и твердые сплавы. Предложены новые катоды с минимальной пористостью и однородной мелкозернистой структурой для плазменно-дугового напыления.

В докладе И. Л. Поболя (Физико-технический институт, Минск) изложена технология формирования гради-



ентных структур типа «сэндвич» на чугунах с использованием горячей пластической деформации и электронно-лучевой обработкой поверхности.

В докладе В. В. Ивашко (Физико-технический институт, Минск) показано, что использование разработанных технологий лазерной закалки или наплавки ножей кормоуборочных комбайнов существенно продлевает их срок службы.

Представило интерес сообщение С. В. Вашенко (Объединенный институт энергетических и ядерных исследований, Минск) об экологически безопасной технологии плазменно-электролитной полировки металлических изделий с получением шероховатости $R_a = 0,04$ мм.

Использование импульсных магнитных полей с энергией 1 кДж для получения более высококачественных отливок представлено в докладе В. А. Глушченкова (Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С. П. Королева). Предложен соответствующий литейный кокиль со встроенной индукторной системой.

Ряд импульсных технологий штамповки металлов был продемонстрирован в докладе Г. Н. Здора (Институт сварки и защитных покрытий, Минск).

Перспективы развития технологий и оборудования для специальных методов литья в машиностроении Республики Беларусь проанализированы в докладе Д. А. Волкова (Институт БелНИИЛит, Минск).

В многочисленных докладах, посвященных технологиям получения новых конструкционных и инструментальных материалов и их обработке, была представлена обширная информация об опыте их применения и о последних лабораторных достижениях.

Ряд усовершенствованных технологий и оборудования для сварки и родственных процессов был представлен в докладах Института электросварки им. Е. О. Патона (Киев), Института сварки и защитных покрытий (Минск), НИИ импульсных процессов (Минск), Физико-технического института (Минск), Белорусского государственного аграрного технического университета (Минск), Белорусско-российского университета (Могилев), СП «Белфин» (Минск).

В одном из докладов В. Ф. Хорунова были продемонстрированы результаты разработок Института электросварки им. Е. О. Патона в области соединения жаропрочных сталей с использованием высокотемпературной пайки. Показана возможность обеспечения более низкой по сравнению с традиционными способами сварки температуры нагрева соединений, исключения расплавления ос-

новного металла, возможность применения в качестве припоев сплавов самых разнообразных композиций, в том числе композиционных припоев и, тем самым, повышение стойкости соединений против образования горячих оклошовных трещин или трещин в зоне термического влияния.

Опыт работ по восстановлению с использованием технологий сварки и продления ресурса эксплуатации цельнолитых узлов производственного оборудования поделится с коллегами В. Д. Позняков (Институт электросварки им. Е. О. Патона). В его докладе были отражены основные подходы к подготовке и проведению ремонтных работ, а также продемонстрированы результаты научных исследований, которые предшествовали разработке технологических процессов сварки.

С докладами «Перспективные направления применения резки кумулятивными зарядами на объектах нефтегазопроводного транспорта» и «О перспективах использования коротких импульсов в материалообработке» выступил Б. И. Паламарчук (Институт электросварки им. Е. О. Патона). В них описан опыт применения высокопроизводительных и безопасных технологий резки взрывом и новые направления развития импульсных технологий обработки материалов.

С большим интересом был воспринят доклад А. А. Кайдалова (Институт электросварки им. Е. О. Патона) «Систематизация научно-технической продукции в области сварки и родственных процессов». В нем дана детальная характеристика основных технических, экономических и юридических аспектов, которые необходимо решать при продвижении научно-технической продукции в производство.

В целом конференция и семинар продемонстрировали высокий научный и инженерный уровень развития технологий металлообработки, но в то же время недостаточно большой объем их применения в промышленности стран СНГ. Предложение научно-технической продукции и инноваций явно превышает спрос промышленности.

Наиболее перспективными технологическими направлениями из рассмотренных на указанных форумах являются: восстановление изделий, импульсные и комбинированные процессы обработки, создание и применение наноматериалов, получение градиентных структур материалов.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук,
В. Д. Позняков, канд. техн. наук

УЧРЕЖДЕНИЕ АЗИАТСКОЙ СВАРОЧНОЙ ФЕДЕРАЦИИ АСФ (АWF)*

Процесс глобализации мировой экономики сопровождается усилением существующих и созданием новых региональных объединений, укрепляющих партнерские отношения стран в области согласованного принятия экономических решений, экономической политики и расширения сотрудничества в области науки, техники, подготовки кадров и т. п. К наиболее развитым региональным объединениям следует отнести ЕС, ОБСЕ в Европе, НАФТА (Североамериканская зона свободной торговли) в Америке и АСЕАН (Ассоциация государств Юго-Восточной Азии) в Азии. В азиатском регионе сравнительно меньше таких экономико-политических объединений, которые косвенно отражают особенности взаимоотношений между развитыми и развивающимися странами Азии и Юго-Восточной Азии. Усиление значения региональных межгосударственных институтов и их роли в согласованном развитии экономики региона, естественно, сопровождается созданием отраслевых и профессиональных объединений, ассоциаций, федераций и др., в том числе и в области сварочного производства и сварочной науки. Так, созданная в Западной Европе в 1992 г. Европейская сварочная федерация (ЕСФ), в которую вошли 32 страны Западной и Восточной Европы, успешно решает многие актуальные проблемы европейского сварочного производства. Деятельность ЕСФ существенно и более конкретно дополняет деятельность в европейском регионе Международного института сварки (МИС).

В 2000 г. по инициативе Сингапурского сварочного общества была учреждена Азиатская сварочная федерация (АСФ), в которую вошли страны группы АСЕАН+3, т. е. десяти стран АСЕАН (Индонезия, Малайзия, Сингапур, Таиланд, Филиппины, Бруней, Вьетнам, Лаос, Мьянма, Камбоджа) плюс Китай, Япония и Южная Корея. Основным мотивом ее организации учредители считают необходимость согласованного взаимодействия в развитии основных аспектов современного сварочного производства в условиях глобализации и растущей конкуренции на мировом рынке сварочной продукции, технологий и инноваций. Многие азиатские страны, вошедшие в АСФ, являются членами МИС. Характерно, что роль и активность вошедших в состав МИС делегаций, Сингапура, Ирана, Тайваня, Индонезии и Бангладеш возрастает с каждым годом.

В состав правления АСФ вошли 35 членов, представляющих 14 сварочных организаций из десяти азиатских стран, а также университеты и научные институты уже имеющие опыт сотрудничества в МИС. Координационный (управляющий) совет АСФ насчитывает пять человек: председатель — Miyada (Япония), сопредседатель — Suchin Katavut (Тайвань) и Wu Yi Xiong (Китай), Ang Chee Pheng (Сингапур) избран руководителем специального распорядительного комитета, финансовые вопросы возложены на Sakaо (Япония). Предусмотрено, что в полноправные члены федерации могут входить один/два представителя из каждой страны-члена АСФ; предусмотрена периодическая ротация национальных делегаций в составе правления АСФ. Судя по составу руководящей структуры АСФ, а также по тому, что возглавляет АСФ председатель Японского сварочного общества (ЯСО) г-н Miyada, на данном этапе ведущая роль в АСФ отведена Японии.

На первом заседании АСФ (2001 г.) обозначены и сформированы следующие основные направления деятельности АСФ на ближайший период:

- гармонизация и унификация региональных программ обучения и норм сертификации сварочного персонала в странах-членах АСФ с аналогичными нормами ведущих стран мира, в частности, со стандартами AWS, ASME, BS, DIN, JAS и IIW;
- систематическое проведение международных азиатских форумов (AWSF) по стандартизации в области сварки прежде всего по стандартам ISO 9000;
- расширение в азиатском регионе системы оптимизации использования квалифицированной рабочей силы (MOS — man power optimization system) применительно к национальным сварочным производствам;
- отбор и системная разработка с соответствующими отраслями промышленности актуальных и инновационных проектов, имеющих общерегиональное значение;
- взаимный обмен различными информационными системами и баз данных — технологическими, экспертными, учебными и справочно-фактографическими;
- создание единой информационной сети, объединяющей все страны-члены АСФ, и открытие Веб-сайта АСФ в сети Интернета.

В число приоритетных направлений деятельности АСФ включены и такие актуальные проблемы современного сварочного производства, как энерго- и ресурсосбережение; организация экологического менеджмента в разрезе ISO 14000; организация мониторинга эксплуатационной надежности сварных конструкций и сооружений; систематическая работа с молодежным персоналом, в частности, проведение семинаров молодых специалистов-сварщиков, а также регулярное анкетирование в странах-членах

* Перепечатка из журнала «Journal of the Japan Welding Society» № 1/2005. — Р. 5–9. Перевод Н. А. Дмитриевой.

АСФ по различным направлениям деятельности сварочного научно-технического сообщества стран региона.

В укрупненном представлении перед АСФ стоит два главных направления.

Первое направление — это переход на стандарты серии ISO 9000 и ускоренная гармонизация внутренних национальных норм по сварке с международными стандартами этой серии. В Японии, где действует правило «Держи по контролем стандарты и будешь управлять рынком», гармонизация стандартов наиболее развита. В японские промышленные стандарты введено уже более 80 из 200 стандартов ISO серии 9000, относящихся к сварке. Рекомендованные МИС нормы также вводятся в азиатских странах-членах АСФ, но в целом положение с гармонизацией национальных регламентов, стандартов и норм по сварке оставляет желать лучшего. АСФ рассчитывает активизировать эту сторону деятельности, используя опыт таких стран, как Япония, Сингапур, Китай и др.

АСФ планирует принимать самое активное участие в работе Технического комитета ТК-44 (сварка) ISO, работа которого всячески поддерживается европейскими странами, а также Японией, но вызывает сильное сопротивление Америки. Особо это проявляется на этапе утверждения окончательных проектов международных стандартов. Предполагается, что АСФ следует принять сторону Европы и Японии и проявлять должную инициативу в области международной стандартизации.

По словам представителя Министерства экономики, торговли и промышленности Японии г-на Иванаго, высказанным им при обсуждении целей создания АСФ, именно введение стандартов ISO позволит Азии в самое ближайшее время довести до 50 % долю своего участия на мировом сварочном рынке. Это, собственно, и является одной из главных задач АСФ.

Представляет также интерес и следующее высказывание г-на Иванаго: «Япония теснит Европу и Америку не только на сварочном рынке, Японии в последнее время уже дышит в затылок Китай. Экономический анализ показывает, что успехи этих двух стран во многом объясняются именно гармонизацией и введением международных стандартов, а также участием в проектах представителей научных институтов и университетов. Японское сварочное общество, которое вошло в состав АСФ на правах фирмы, готово поделиться своим опытом в этой области и помочь федерации в завоевании мирового сварочного рынка.

Второе главное направление в деятельности АСФ, имеющей действительно межгосударственное значение для стран-членов федерации, — это подготовка высококвалифицированного сварочного персонала на основе разработки и применения современных средств и норм обучения. Актуальность этой проблемы усиливает, с одной стороны, постоянный дефицит квалифицированных (дипломированных) сварщиков, а с другой, приток иностранной неаттестованной рабочей силы. Упомянутая выше система оптимизации рабочей силы MOS предусматривает создание национальных баз данных по различным рабочим профессиям и соответствующие нормы и правила по использованию рабочей силы, не прошедшей национальную аттестацию и не имеющей международных сертификатов (для сварщиков). Действующая в ряде стран-членов АСФ система MOS охватывает не только сварщиков-ручников, сварщиков-операторов, но и распространяется на операторов технической диагностики и контролеров качества сварки. В Сингапуре ограничения по системе MOS на использование рабочей силы сварочных профессий, не имеющей международных сертификатов, введены на десять лет. Более широкое использование этой системы ожидается в Тайване, Малайзии и на Филиппинах.

На данном этапе решение проблемы профессионального обучения, переподготовки и квалификационной аттестации кадров АСФ видит прежде всего в использовании богатого опыта ЕСФ, которая стандартизировала нормы обучения и аттестации сварочного персонала, организовала подготовку рабочих и специалистов международного (европейского) уровня и ввела паспорт сварщика, что упрощает регистрацию специалистов и создание единого банка рабочей силы. АСФ наметила включение в систему MOS также инженеров, технологов и других специалистов-сварщиков, имеющих международный сертификат.

В программе деятельности АСФ предусмотрено проведение периодических анкетных опросов специалистов стран-членов АСФ, введение английской сварочной терминологии и издание двуязычных терминологических словарей, прогнозно-аналитическая деятельность в области сварочной науки и техники, а также маркетинговые исследования мирового и региональных рынков сварочной техники.