



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, В. Н. Замков,
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, Ю. А. Стеренбоген,
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) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:
Е. Н. Казарова, В. И. Котляр, 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

Григоренко Г. М., Головки В. В., Костин В. А., Грабин В. Ф. Влияние микроструктурных факторов на склонность к хрупкому разрушению сварных швов с ультранизким содержанием углерода 3

Максимов С. Ю. Оценка влияния условий подводной мокрой сварки на вероятность образования пор в металле шва 12

Кузьменко В. Г., Гузей В. И. Порообразование в металле шва при сварке под флюсом с поверхностным насыщением зерен фтором 16

Шонин В. А., Гуца О. И., Машин В. С., Ковальчук В. С., Кузьменко А. З. Влияние размеров образца сварного соединения алюминиевого сплава на остаточную напряженность и сопротивление усталости 21

Ульшин В. А., Харламов М. Ю. Оптимизация параметров детонационно-газового напыления с использованием генетического алгоритма 32

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Блащук В. Е., Шеленков Г. М. Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор) 38

Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Лукашенко А. Г. Резка излучением СО₂-лазера корпусов дисковых пил 47

Ворновицкий И. Н., Захарова Н. В., Шишкова О. В., Вилисов А. А., Зинченко А. В. Технологические особенности сварки высоколегированных сталей электродами с рутиловым покрытием 50

Илларионов С. Ю., Добрушин Л. Д., Поляков С. Г., Боева Г. Е. Повышение коррозионной стойкости сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов плакированием взрывом 52

Жадкевич А. М. Лучевые источники нагрева для пайки (Обзор) 56

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Киселевский Ф. Н., Долиненко В. В., Топчев Д. Д. Метод разработки программного обеспечения с использованием управляющих графов и языковых средств ISaGRAF для интеллектуальных сварочных контроллеров 64

Новости 65

Диссертации на соискание ученой степени 67

Патенты в области сварочного производства 68

По зарубежным журналам 70

Новые книги 73

ИНФОРМАЦИЯ 75

Разработано в ИЭС 20, 37, 46, 55

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 2 (622)
February 2005

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

Yu. S. Borisov, N. M. Voropai,
V. F. Grabin, V. N. Zamkov,
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, Yu. A. Sterenbogen,
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. Diltey (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) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://www.nas.gov.ua/pwj>

Editors:

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

- Grigorenko G. M., Golovko V. V., Kostin V. A., Grabin V. F.** Effect of microstructural factors on susceptibility of welds with an ultra-low carbon content to brittle fracture 3
- Maksimov S. Yu.** Evaluation of effect of underwater wet welding conditions on probability of pore formation in weld metal 12
- Kuzmenko V. G., Guzej V. I.** Pore formation in weld metal in submerged arc welding with a surface saturation with fluorine 16
- Shonin V. A., Gushcha O. I., Mashin V. S., Kovalchuk V. S., Kuzmenko A. Z.** Effect of sizes of aluminium alloy welded joint specimen on residual stress intensity and fatigue resistance 21
- Ulshin V. A., Kharlamov M. Yu.** Optimizing of parameters of detonation-gas spraying using a genetic algorithm 32

INDUSTRIAL

- Blashchuk V. E., Shelenkov G. M.** Fusion welding of titanium and its alloys (Review) 38
- Shelyagin V. D., Khaskin V. Yu., Lukashenko A. G.** Cutting of circular saw casings by CO₂-laser radiation 47
- Vornovitsky I. N., Zakharova N. V., Shishkova O. V., Vilisov A. A., Zinchenko A. V.** Technological peculiarities of high-alloy steel welding with rutile electrodes 50
- Illarionov S. Yu., Dobrushin L. D., Polyakov S. G., Boeva G. E.** Increase in corrosion resistance of welded joints of high-strength aluminium alloys using explosion cladding 52
- Zhadkevich A. M.** Beam heat sources for brazing (Review) 56

BRIEF INFORMATION

- Kiselevsky F. N., Dolinenko V. V., Topchev D. D.** Method of software development using controlling graphs and language ISaGRAF for intellectual welding controllers 64
- News 65
- Theses for scientific degree 67
- Patents in the field of welding 68
- Review of foreign journals 70
- New books 73

INFORMATION 75

- Developed at the PWI 20, 37, 46, 55

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.



ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА СКЛОННОСТЬ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ ШВОВ С УЛЬТРАНИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА

Чл.-кор. НАН Украины **Г. М. ГРИГОРЕНКО**, **В. В. ГОЛОВКО**, канд. техн. наук, **В. А. КОСТИН**, инж.,
В. Ф. ГРАБИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены морфологические особенности микроструктуры металла швов с ультранизким содержанием углерода. Показано, что в таких швах структурным фактором нестабильности свойств является как МАК-фаза, так и пластинчатые формы феррита. Установлено, что для получения стабильно высоких механических свойств при низких температурах необходимо, чтобы объемная доля МАК-фазы не превышала 5...6 % при низком содержании феррита с упорядоченной второй фазой. Показано, что с увеличением доли пластической составляющей в изломе ударная вязкость исследуемых швов возрастает.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированные стали, металл шва, ультранизкое содержание углерода, структура, игольчатый феррит, МАК-фаза, феррит с упорядоченной и неупорядоченной второй фазой, структурные составляющие, квазискор, ударная вязкость

Оптимальные прочностные и пластические свойства металла швов низколегированных сталей в основном достигаются за счет благоприятного сочетания комплекса ферритно-цементитных структур. В металле таких швов образуются следующие структурные составляющие: игольчатый феррит (ИФ), полигональный (аллотриаморфный) феррит (ПФ), видманштеттовый феррит (ВФ), феррит с упорядоченной (УВФ) и с неупорядоченной (НУВФ) второй фазой, а также мартенситно-аустенитно-карбидная фаза (МАК-фаза), формирующаяся в процессе распада аустенита.

Известно [1, 2], что среди указанных структурных составляющих ИФ имеет наилучшие свойства с точки зрения сопротивления хрупкому разрушению, что обусловлено его морфологическими особенностями, а именно: ИФ формируется преимущественно внутри первичных кристаллитов; его иглы имеют длину 2...8 мкм и толщину 1...2 мкм, а соотношение их сторон — 1:3...1:10; между иглами формируются высокоугловые границы с углом разориентации, составляющим более 20°; на границах раздела между ферритными зернами образуются микрофазы — карбиды или МАК-фаза; внутри зерен ИФ дислокации имеют высокую плотность ($\rho = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

Вместе с тем, анализ литературных данных показал, что в ряде случаев не удается добиться высокой хладостойкости металла швов несмотря на наличие в них ИФ [3, 4]. Из данных, приведенных на рис. 1, видно, что ударная вязкость несколько снижается при содержании в металле шва свыше 70 об. % ИФ. Исходя из того, что эти результаты получены на образцах металла швов с массовой долей углерода 0,12...0,15 % можно предположить, что такой эффект обусловлен влиянием неучтенного структурного фактора, например, МАК-фазы.

В работе [4] снижение ударной вязкости металла швов с высоким содержанием легирующих элементов объясняется возрастанием его предела прочности без соответствующего уменьшения размера зерен. Однако существует и другая точка зрения, в соответствии с которой снижение ударной вязкости связывают с наличием в металле швов микрофаз, являющихся подобно оксидным включениям источником зарождения хрупкой трещины [5, 6].

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния структурных составляющих металла швов на ее склонность к хрупкому разрушению при низких температурах и выявлении факторов, приводящих к снижению свойств металла швов, содержащего ИФ.

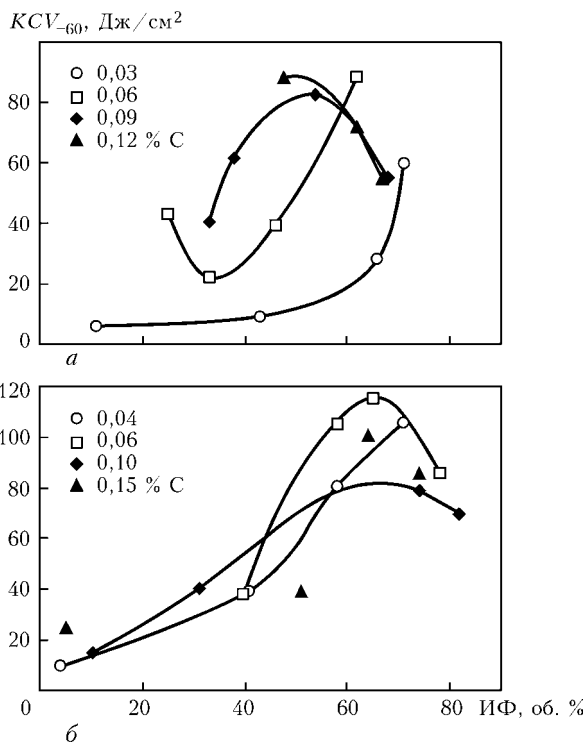


Рис. 1. Влияние объемной доли ИФ на ударную вязкость KCV по экспериментальным данным [3] (a) и [4] (б)



Таблица 1. Химический состав (мас. %) металла швов и сварочных проволок в исследованных образцах

| Марка проволоки, № шва | C | Al | Si | Ti | Ni | Mn | Mo | Cr | Cu | S | P |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Св-03Г2Н2МТА, 1 | 0,030 | 0,003 | 0,140 | 0,004 | 2,63 | 1,16 | 0,60 | 0,27 | 0,15 | 0,011 | 0,011 |
| | 0,058 | 0,013 | 0,330 | 0,006 | 1,72 | 0,92 | 0,44 | 0,32 | 0,30 | 0,010 | 0,011 |
| Св-03Г2Н2МТА, 2 | 0,030 | 0,002 | 0,160 | 0,004 | 2,58 | 1,65 | 0,17 | 0,28 | 0,15 | 0,011 | 0,010 |
| | 0,045 | 0,010 | 0,340 | 0,005 | 1,71 | 0,69 | 0,23 | 0,30 | 0,30 | 0,010 | 0,012 |
| Св-04НЗГМТА, 3 | 0,036 | 0,002 | 0,235 | 0,018 | 2,53 | 1,01 | 0,26 | 0,10 | 0,16 | 0,014 | 0,007 |
| | 0,048 | 0,012 | 0,460 | 0,008 | 1,87 | 0,99 | 0,30 | 0,24 | 0,30 | 0,014 | 0,009 |
| Св-06Г2НМТА, 4 | 0,060 | 0,002 | 0,200 | 0,008 | 1,20 | 1,40 | 0,52 | 0,26 | 0,16 | 0,011 | 0,016 |
| | 0,073 | 0,013 | 0,420 | 0,013 | 1,27 | 1,28 | 0,27 | 0,28 | 0,40 | 0,010 | 0,016 |

Методика проведения эксперимента. В качестве объекта исследований выбраны образцы металла швов, в которых экспериментально установлено снижение ударной вязкости при отрицательных температурах в случае содержания в его структуре более чем 70 об. % ИФ. Данные швы получены при выполнении стыковых соединений с V-образной разделкой кромок (угол раскрытия 60°) на стали 10ХСНД толщиной 32 мм с использованием нейтрального флюса АНК-57 (DIN 32 522; ВFB 155; DC 8; КМНР 5) и четырех сварочных проволок Св-03Г2Н2МТА, Св-03Г2Н2МТА, Св-04НЗГМТА и Св-06Г2НМТА (ТУ 14-143-508-99). Выбор типа сварочной проволоки определялся задачей получения швов с различным содержанием углерода, никеля и молибдена. Сварку выполняли на постоянном токе обратной полярности на следующем режиме: $I_{св} = (620 \pm 5) \text{ А}$; $U_{д} = (30 \pm 1) \text{ В}$; $v_{св} = (20 \pm 0,5) \text{ м/ч}$; $q_{св} \cong 48 \text{ кДж/см}$. Скорость охлаждения шва составляла 4...7 °С/с в диапазоне температур 800...500 °С.

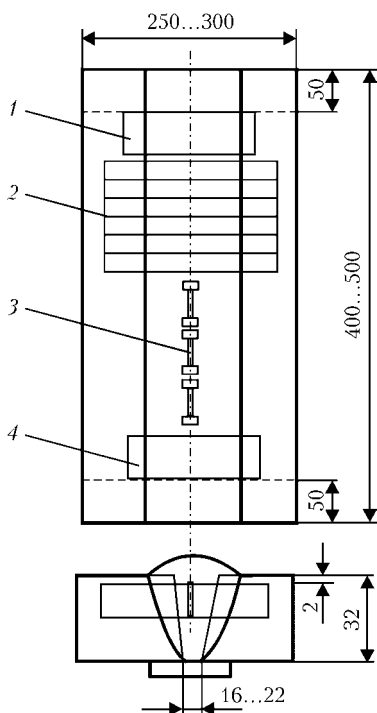


Рис. 2. Схема отбора образцов для металлографических исследований и определения механических свойств наплавленного металла сварных швов: 1, 4 — шлифы для металлографических исследований; 2, 3 — образцы для определения соответственно ударной вязкости и прочности

Химический состав металла последнего прохода сварного шва определяли методом спектрального анализа на установке «Baird», оборудованной компьютером IBM PC. Для каждого образца проводили от трех до пяти определений, полученные результаты усредняли. Результаты анализа химического состава металла швов и сварочных проволок представлены в табл. 1.

Из металла швов отобраны образцы для определения механических свойств наплавленного металла (рис. 2).

Количественное определение микроструктурных составляющих проводили в соответствии с методикой МИС [7]. Содержание легирующих элементов в твердом растворе и состав неметаллических включений определяли методом микрорентгеноспектрального анализа с помощью энергодисперсионного спектрометра Link 860/500 фирмы «Link System» и волнодисперсионного спектрометра «Ortec» фирмы «Ortec». Микроструктура металла исследованных швов приведена на рис. 3.

Результаты исследований. В ходе металлографических исследований установлено, что для всех образцов наплавленного металла характерно наличие таких составляющих, как ИФ, ПФ и МАК-фаза. Кроме того, выявлено незначительное содержание пластинчатых форм феррита, под которыми согласно классификации МИС, подразумеваются УВФ и НУВФ. Эти формы феррита следует принимать во внимание, поскольку такой тип структуры может оказать заметное влияние на склонность металла швов к хрупкому разрушению. Данные о содержании структурных составляющих в исследованных образцах приведены в табл. 2.

Методом количественного микроанализа, проведенного на растровом электронном микроскопе JSM-840, с помощью программы анализа плоских поверхностей ZAF4/FLS на протравленных образцах определена массовая доля элементов в ИФ и ПФ. Содержание легирующих элементов в МАК-

Таблица 2. Объемная доля (%) основных структурных составляющих в металле швов

| № шва | ПФ | ИФ | УВФ | НУВФ | МАК-фаза |
|-------|------|------|-----|------|----------|
| 1 | 13,7 | 61,1 | 1,5 | 18,5 | 5,15 |
| 2 | 29,4 | 51,0 | 2,5 | 11,5 | 5,00 |
| 3 | 19,4 | 70,5 | 2,6 | 2,5 | 6,97 |
| 4 | 15,8 | 73,4 | 4,5 | 3,5 | 6,42 |

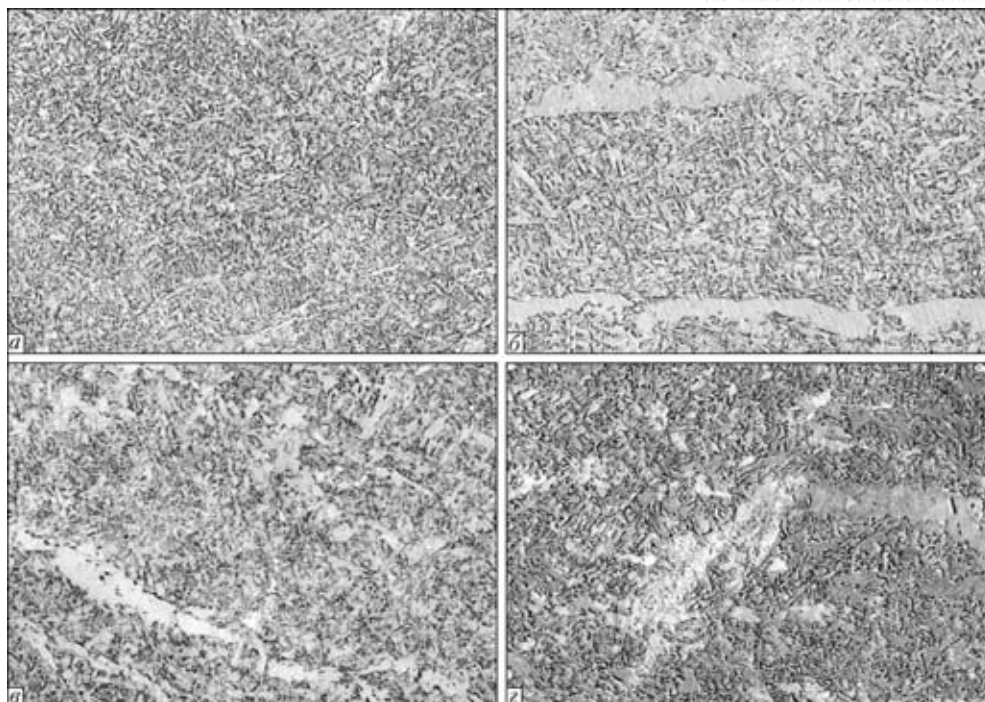


Рис. 3. Микроструктура (×500) металла швов (a–г соответствуют № 1–4 в табл. 2)

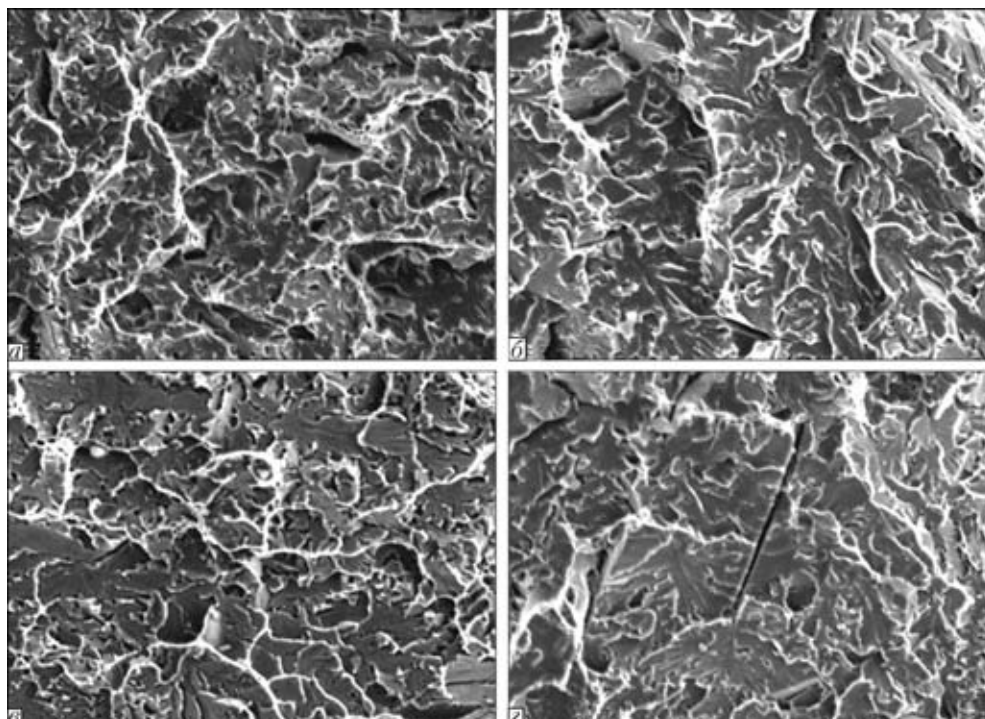


Рис. 4. Фрактография (×1000) поверхности разрушения металла швов (a–г соответствуют № 1–4 в табл. 2)

фазе и на поверхности изломов выявили с помощью программы ZAF/PB, предназначенной для анализа частиц и грубых поверхностей (изломов). Полученные результаты представлены в табл. 3. Исследования показали, что ИФ, по сравнению с ПФ, в большей степени обогащен никелем и молибденом, а в МАК-фазе содержание этих элементов наибольшее.

Фрактографическое изучение поверхности разрушения (рис. 4) показало, что во всех образцах разрушение проходит по одинаковому механизму. На поверхности разрушения можно выделить участ-

тки квазискола («вязкого» скола), представляющие собой небольшие фасетки хрупкого разрушения размером 2...5 мкм, разделенные высокоугловыми границами, а также участки вязкого ямочного разрушения. Характерным элементом излома поверхности разрушения исследованных швов являются протяженные ветвистые линии, называемые гребешками. Для металла шва № 1 характерно равномерное распределение фасеток квазискола, размер которых сопоставим с размером ферритных игл (1...6 мкм). Исследования показали, что в швах № 2–4 имеются протяженные участки



Таблица 3. Содержание легирующих элементов (мас. %) в структурных составляющих металла исследуемых швов

| № шва | Структурные составляющие | Al | Si | Ti | Ni | Mn | Mo | Cr | Cu | S | P |
|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | ИФ | 0,007 | 0,326 | 0,024 | 2,120 | 0,795 | 1,574 | 0,269 | 0,438 | 0,005 | 0,009 |
| | ПФ | 0,104 | 0,357 | 0,004 | 1,824 | 0,911 | 0,085 | 0,333 | 0,257 | 0,008 | 0,004 |
| | МАК-фаза | 0,002 | 0,392 | 0,037 | 2,184 | 0,680 | 1,944 | 0,180 | 0,259 | 0 | 0,025 |
| 2 | ИФ | 0,007 | 0,263 | 0,048 | 1,890 | 0,686 | 0,548 | 0,276 | 0,350 | 0,006 | 0,005 |
| | ПФ | 0,155 | 0,352 | 0,004 | 1,712 | 0,378 | 0,109 | 0,229 | 0,372 | 0,005 | 0,007 |
| | МАК-фаза | 0,000 | 0,321 | 0 | 2,302 | 0,598 | 1,208 | 0,069 | 0,202 | 0 | 0,007 |
| 3 | ИФ | 0,055 | 0,438 | 0,045 | 1,924 | 0,848 | 0,833 | 0,242 | 0,283 | 0,009 | 0,003 |
| | ПФ | 0,097 | 0,504 | 0,007 | 1,689 | 0,769 | 0,045 | 0,189 | 0,200 | 0,004 | 0,009 |
| | МАК-фаза | 0,002 | 0,405 | 0,001 | 2,381 | 0,611 | 2,508 | 0,143 | 0,326 | 0 | 0,007 |
| 4 | ИФ | 0,009 | 0,367 | 0,052 | 1,831 | 1,123 | 0,741 | 0,257 | 0,397 | 0,006 | 0,006 |
| | ПФ | 0,079 | 0,375 | 0,007 | 1,558 | 0,665 | 0,157 | 0,251 | 0,440 | 0,005 | 0,011 |
| | МАК-фаза | 0,005 | 0,365 | 0,013 | 2,228 | 0,727 | 1,590 | 0,214 | 0,109 | 0 | 0,009 |

скола шириной 10...20 мкм и длиной 50...100 мкм, вытянутые в одном направлении.

Для того чтобы определить структурные составляющие, по которым проходит разрушение, необходимо исследовать состав металла характерных участков излома исследуемых швов и сопоставить их с составом структурных составляющих, представленных в табл. 3. В качестве объектов анализа выбрали участки квазискола, вязкого ямочного разрушения и поверхность разрушения типа «гребешки» — область пластической деформации.

Результаты микроанализа характерных участков излома металла швов представлены в табл. 4.

Установлено, что разрушение происходит по определенным структурным составляющим. Сопоставление результатов анализа химического состава металла поверхности разрушения, приведенных в табл. 3 и 4, а также характерных размеров и морфологии элементов излома (квазискол, ямочный, «гребешки») и структуры (ИФ, ПФ, МАК-фаза) позволило заключить, что участки квазискола преимущественно связаны с ИФ, а вязкие участки — с ПФ. Анализ изломов показал, что в металле исследованных швов разрушение происходило в основном по зернам ИФ и феррита

с УВФ. Различия заключались лишь в количественном соотношении площадей изломов, занятых ИФ и ферритом с УВФ.

Использование традиционной методики анализа изломов по макроизображению в швах, где разрушение осуществлялось квазисколом, оказалось малоэффективным. Это связано с тем, что при стандартной классификации участки квазискола будут полностью отнесены к хрупкой составляющей излома. На самом деле, доля хрупкой составляющей (темные участки на рис. 5, а, в, д, ж) в участках квазискола составляет только часть излома. Для данного типа излома характерно наличие значительной доли пластической составляющей (белые участки на рис. 5, а, в, д, ж), которая непосредственно связана с процессом развития трещины. В связи с этим интересно проанализировать взаимосвязь между долей пластической составляющей в квазисколе и ударной вязкостью. С помощью программы анализа изображений «Image-ProPlus» версия 3.0 выделим пластическую составляющую (белые участки на рис. 5, б, г, е, з) в участках квазискола и рассмотрим взаимосвязь между долей пластической составляющей и ударной вязкостью металла швов (рис. 6).

Таблица 4. Содержание легирующих элементов (мас. %) в металле характерных участков излома исследуемых швов

| № шва | Вид излома | Al | Si | Ti | Ni | Mn | Mo | Cr | Cu | S | P |
|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Квазискол | 0,032 | 0,408 | 0,139 | 2,145 | 0,878 | 1,656 | 0,497 | 0,253 | 0 | 0,008 |
| | Ямочный | 0,000 | 0,392 | 0,089 | 1,821 | 1,056 | 0,040 | 0,477 | 0,431 | 0 | 0 |
| | «Гребешки» | 0,266 | 0,569 | 0,017 | 2,028 | 0,810 | 1,540 | 0,312 | 0,405 | 0,181 | 0 |
| 2 | Квазискол | 0 | 0,360 | 0,000 | 1,834 | 0,782 | 0,430 | 0,466 | 0,276 | 0 | 0 |
| | Ямочный | 0,056 | 0,293 | 0,000 | 1,617 | 0,526 | 0,135 | 0,444 | 0,123 | 0 | 0 |
| | «Гребешки» | 0 | 0,562 | 0,086 | 2,426 | 0,871 | 1,120 | 0,205 | 0,540 | 0 | 0 |
| 3 | Квазискол | 0,193 | 0,454 | 0,276 | 1,902 | 0,878 | 0,865 | 0,504 | 0,765 | 0 | 0 |
| | Ямочный | 0 | 0,525 | 0,057 | 1,613 | 0,746 | 0,120 | 0,450 | 0,109 | 0 | 0 |
| | «Гребешки» | 0,000 | 0,528 | 0,020 | 2,596 | 0,872 | 2,108 | 0 | 0,108 | 0 | 0 |
| 4 | Квазискол | 0,203 | 0,272 | 0,013 | 1,896 | 0,995 | 0,782 | 0,122 | 0,578 | 0,046 | 0 |
| | Ямочный | 0,077 | 0,224 | 0,057 | 1,573 | 0,753 | 0,090 | 0,298 | 0,489 | 0 | 0,002 |
| | «Гребешки» | 0,158 | 0,647 | 0,047 | 2,167 | 0,882 | 0,816 | 0,319 | 0,495 | 0,050 | 0,085 |

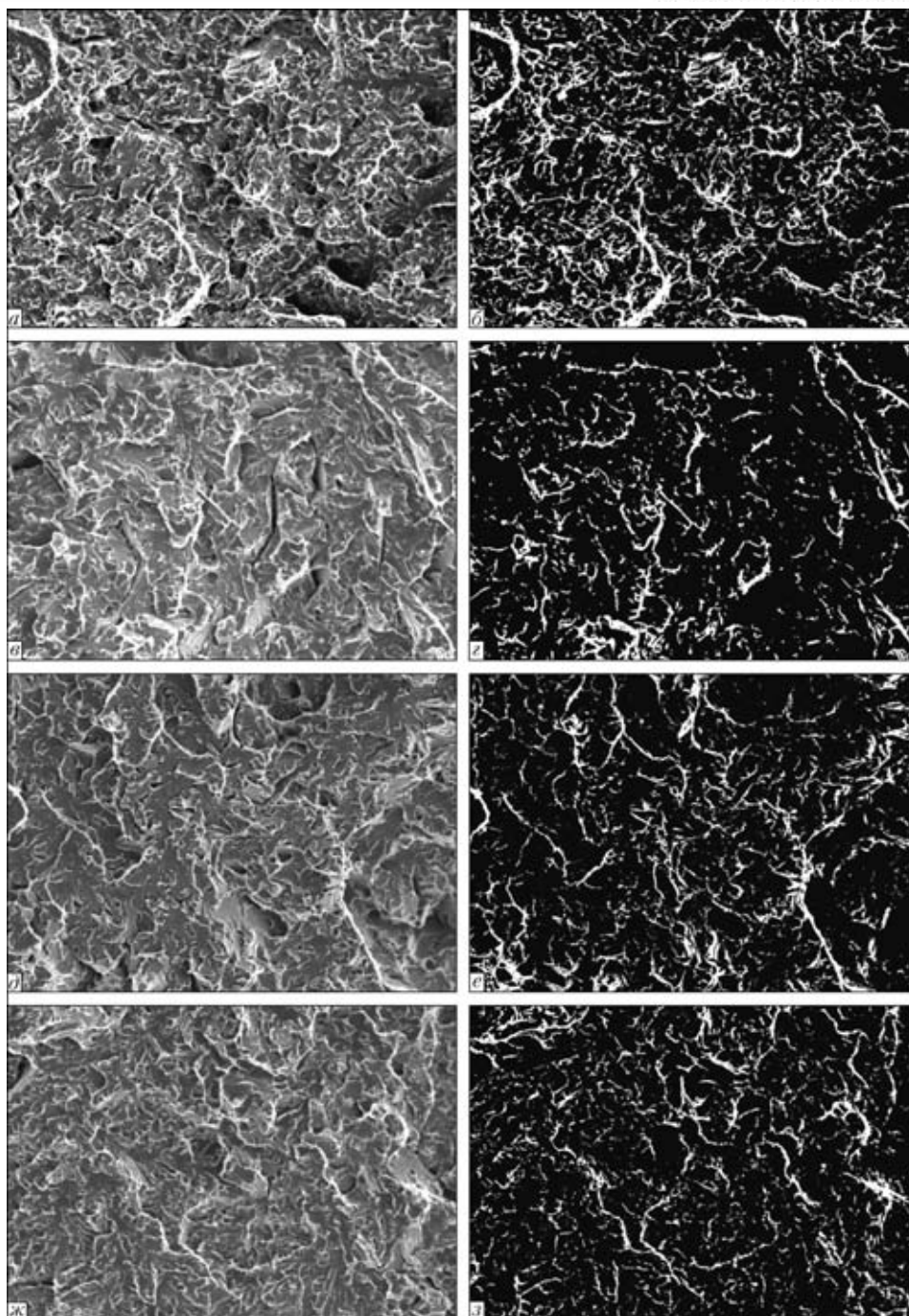


Рис. 5. Фрактография ($\times 500$) излома металла швов и выделенные в них пластические зоны (б, в, г, д), составляющие 15,7 (б); 8,5 (в); 9,7 (г) и 8,7 об. % (д) (а и б, в и г, д и в, г и д соответствуют № 1–4 в табл. 2)

По образцам, полученным из металла исследованных швов, определены их механические свойства, результаты которых приведены в табл. 5.

Исследования показали, что увеличение доли пластической составляющей в области квазискола способствует повышению ударной вязкости при низких температурах (рис. 6).

Для определения роли той или иной структурной составляющей в процессе хрупкого разрушения необходимо выявить их на поверхности изломов. Для этого разработана специальная методика травления поверхности изломов. Сложность ее заключалась в том, что при травлении на развитой шероховатой поверхности присутствуют пу-

зырьки воздуха, препятствующие процессу травления. Для удаления воздушных пузырьков использовали ультразвуковой диспергатор, создающий в растворе стоячие волны, в результате поверхность излома постоянно омывается травителем. В качестве травителя выбраны щелочный раствор пикриновой кислоты (пикрат) и 4%-й раствор азотной кислоты в спирте (ниталь). Микроструктура металла шва на поверхности излома представлена на рис. 7.

Исследованиями установлено, что трещины в металле шва № 1 проходят преимущественно по ИФ, при этом на поверхности разрушения (рис. 8, а) выявлено значительная объемная доля МАК-фазы



KCV_{-60} , Дж/см²

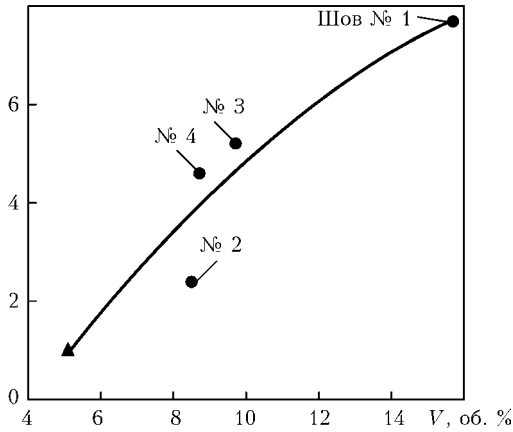


Рис. 6. Влияние объемной доли V пластической составляющей в областях квазискола на ударную вязкость швов KCV_{-60} низколегированных сталей: \blacktriangle — результаты, полученные при температуре -196°C

($V_{\text{МАК}} = 3,56\%$), которая, как отмечено выше, выделяется по границам ферритных пластин. С помощью методики анализа изображений поверхности изломов швов выявлена МАК-фаза и определена ее объемная доля на поверхности разрушенных образцов (рис. 9, б).

Изучение фрактурграфии изломов швов № 2–4 показало, что плоскости разрушения проходят как по зернам со структурой ИФ, так и по зернам, в которых формируется феррит с УВФ. Можно предположить, что в данном случае реализуется два возможных варианта развития трещин. В первом трещина проходит поперек зерен феррита с УВФ (рис. 10, а), причем карбидные фазы (в частности, МАК-фаза) являются эффективными барьерами на пути ее распространения. Во втором варианте трещина инициируется на межфазной границе карбид–феррит и распространяется по гра-

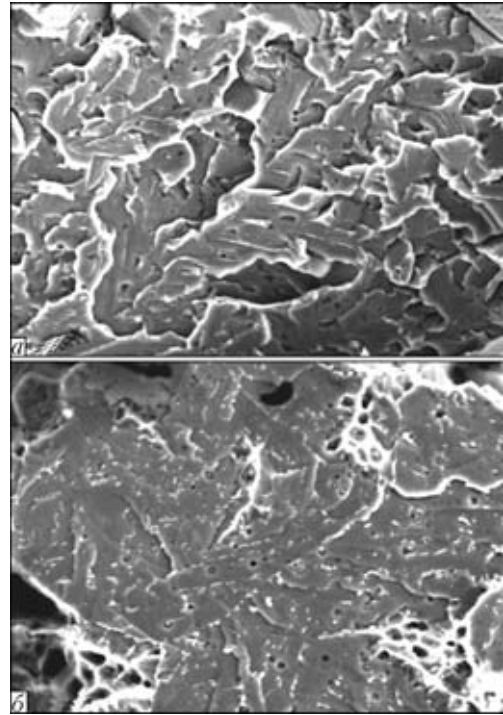


Рис. 7. Микроструктура ($\times 2000$) металла шва № 1 на поверхности изломов при травлении в пикрате (а) и нитале (б)

ницам зерен феррита с УВФ (рис. 10, б). В результате на поверхности излома фиксируется продольный вид карбидных частиц. Различий в составе карбидной фазы при продольном и поперечном распространении трещины по зернам феррита с УВФ установлено не было.

Анализ результатов и их обсуждение. Полученные результаты позволяют сделать предположение о возможном характере механизма разрушения образцов исследованных швов. Разрушение осуществлялось сколом по телу ферритных

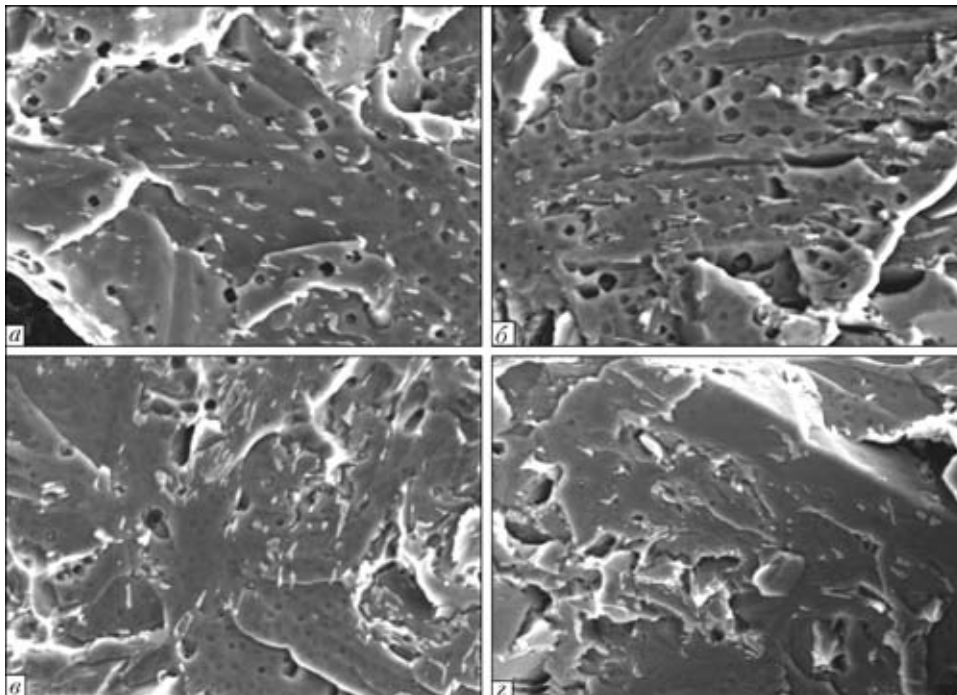


Рис. 8. Микроструктура ($\times 3000$) с выделениями МАК-фазы на поверхности разрушения металла швов низколегированных высокопрочных сталей (а–г соответствуют № 1–4 в табл. 2)

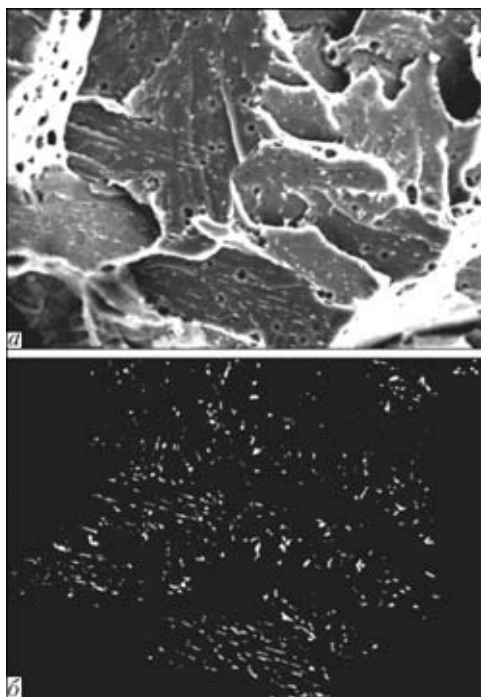


Рис. 9. Микроструктура ($\times 2000$) поверхности разрушения металла шва № 1 (а) (табл. 2) и выделенная в ней МАК-фаза (б)

игл в зернах ИФ. Поскольку между иглами существуют высокоугловые границы, трещины меняют направление движения, при этом происходит образование новой фасетки разрушения. Смена направления их движения требует дополнительных энергетических затрат. Поэтому, чем мельче размер игл и выше пространственная разориентировка двух соседних игл в зернах ИФ, тем большую энергию необходимо приложить для развития трещины и тем выше будут значения ударной вязкости [8]. Смена направления распространения трещины происходит по границам ферритных игл с образованием на поверхности разрушения типа гребешков. Как показали исследования (см. рис. 3), МАК-фаза в основном формируется по границам ферритных игл, поэтому следует ожидать совпадения результатов микроанализа химического состава МАК-фазы и гребешков на поверхности разрушения. Данное предположение получило экспериментальное подтверждение (см. табл. 3 и 4). Наличие МАК-фазы на границах ферритных игл и угла разориентировки соседних зерен ИФ тормозит процесс разрушения квазисколом [9]. Анализ полученных результатов показал, что незначительное увеличение объемной доли МАК-фазы (с 0 до 5... 6 %) способствует повышению ударной вязкости (рис. 11), а при доле МАК-фазы более 6 % ударная вязкость снижается. Для получения более полной картины влияния МАК-фазы на ударную вязкость необходимо исследовать швы с более высокой объемной долей МАК-фазы. При построении графика в области высоких значений МАК-фазы нами использованы как данные, приведенные в работе [10], так и полученные экспериментально на образцах, в которых объемная доля МАК-фазы составляла приблизительно 19 %.

Характер взаимосвязи между МАК-фазой и ударной вязкостью, показанный на рис. 11, по-

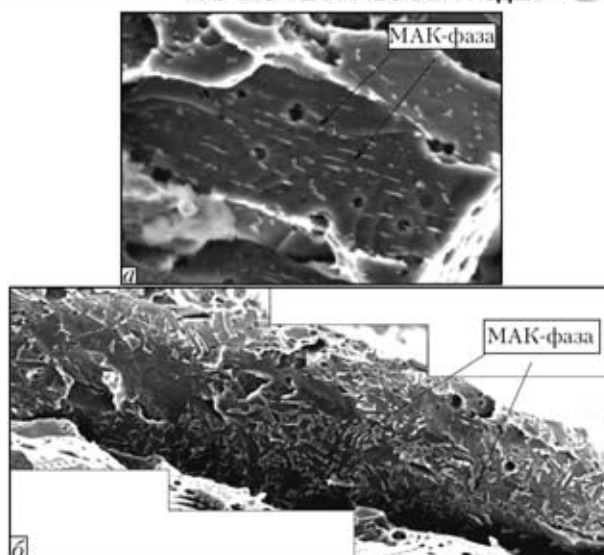


Рис. 10. Разрушение по ферриту с упорядоченной второй фазой ($\times 2300$): а — распространение трещины поперек зерен феррита с УВФ (№ 1 в табл. 2); б — вдоль зерен феррита с УВФ (№ 3 в табл. 2)

видимому, связан с изменением механизма ее влияния на зарождение и развитие трещины. Если объемное содержание МАК-фазы незначительное (до 5... 6 %), то она выступает в роли упрочняющей второй фазы и тормозит развитие трещины. При $V_{\text{МАК}} > 5... 6 \%$ сама МАК-фаза становится источником зарождения трещин вследствие наличия в ней хрупкой составляющей — мартенсита (а возможно, и остаточного аустенита). Поэтому с увеличением объемной доли МАК-фазы в металле исследованных швов более чем на 5... 6 % ударная вязкость его снижается.

Изменение механизма влияния МАК-фазы на процесс разрушения зависит от ее состава. Напряжения на границе МАК-фазы и ферритной матрицы взаимосвязаны с их составом, что обусловлено их различными линейными коэффициентами термического расширения. Состав МАК-фазы может влиять на напряженное состояние на межфазной границе, в результате процесс образования трещины будет либо тормозиться, либо, наоборот, получать развитие. К сожалению, наши исследования этот факт не подтвердили (см. табл. 3 и 4), что, по-видимому, связано с особенностями опре-

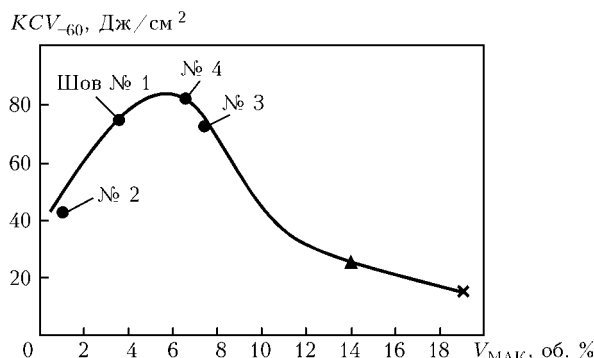


Рис. 11. Влияние объемной доли МАК-фазы в изломе на ударную вязкость металла шва: ▲ — по данным [10]; × — результаты, полученные после термической обработки шва № 1 (нагрев до 730 °С и быстрое охлаждение в воде)



KCV_{-60} , Дж/см²

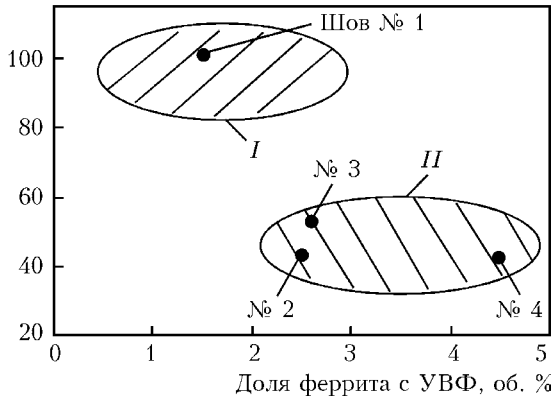


Рис. 12. Влияние содержания феррита с УВФ на ударную вязкость сварных швов: I, II — области, в которых разрушение происходит соответственно поперек зерен феррита с УВФ и смешанным образом

деления составов частиц малых (менее 1 мкм) размеров. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Исходя из представленных выше результатов, можно объяснить факт снижения ударной вязкости в металле швов с большой (выше 70 %) объемной долей ИФ. В работе [11] установлено, что количество МАК-фазы возрастает с увеличением объемной доли ИФ в металле шва. Полученные нами результаты показали, что если объемная доля МАК-фазы превышает определенное значение (для исследуемых швов порядка 6 %), то ударная вязкость металла швов понижается. Таким образом, положительное влияние ИФ нивелируется отрицательным влиянием МАК-фазы, в результате ударная вязкость не только не повышается или остается на том же уровне, но может и заметно снизиться (см. рис. 1). Понятно, что, чем выше содержание углерода и карбидообразующих элементов, тем сильнее этот эффект проявляется.

Кроме содержания МАК-фазы, на характер разрушения влияет также топография ее распределения. Согласно классификации МИС [7], в случае, если частицы МАК-фазы расположены параллельно друг другу и ориентированы вдоль ферритных границ, то такая структурная составляющая классифицируется как феррит с УВФ. Она может оказывать влияние на вязкость разрушения металла сварных швов низколегированных сталей [12], хотя авторы ее называют бейнитным пакетом.

Наличие на поверхности разрушения феррита с УВФ (см. рис. 10, а) позволяет сделать вывод,

что это, возможно, также является фактором нестабильности ударной вязкости при низких температурах в металле швов низколегированных сталей. Анализ изломов исследуемых швов дает возможность утверждать, что в случае высоких значений ударной вязкости трещина распространяется поперек зерен феррита с УВФ (рис. 12), что характерно для металла шва № 1. В металле швов с низкими значениями ударной вязкости (№ 2–4) распространение магистральной трещины носит смешанный характер и происходит как поперек, так и вдоль границ ферритных пластин (см. рис. 10, б). Различный уровень ударной вязкости, наблюдаемый в металле швов № 1 и 3 (табл. 5), можно объяснить различным характером распространения трещины.

Установив, что МАК-фаза и феррит с УВФ ответственны за снижение низкотемпературной хрупкости швов высокопрочных низколегированных сталей, необходимо было выполнить количественную оценку способности структуры металла шва к сопротивлению разрушения при низкой температуре. В качестве такого параметра выбрана доля пластической составляющей в изломе образцов, полученных при испытаниях на ударную вязкость при температуре реализации чисто хрупкого разрушения $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 5). В отличие от традиционного подхода к макроскопическому описанию излома при рассмотрении данного вопроса нами принят микроскопический подход. По фрактографии изломов определяли долю пластической составляющей, которая, помимо традиционного «вязкого» ямочного излома, учитывала пластическую составляющую, формирующуюся при распространении трещины от одной хрупкой фасетки разрушения к другой (см. рис. 5). При этом установлена хорошая корреляция между долей пластической составляющей в изломе и ударной вязкостью металла шва (см. рис. 6).

Выводы

1. С использованием предложенной методики выявлена МАК-фаза на поверхности изломов и определено снижение ударной вязкости при низких температурах.

2. С помощью методики выделения пластической составляющей в областях квазискола установлена взаимосвязь между ее содержанием и ударной вязкостью металла швов низколегированных

Таблица 5. Механические свойства исследованных швов

| № шва | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа | Относительное удлинение, % | Относительное сужение, % | Ударная вязкость KCV_{-60} , Дж/см ² | Ударная вязкость KCV_{-173} , Дж/см ² |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|--|
| 1 | $\frac{562, \dots 572,5}{568,5}$ | $\frac{701,7 \dots 719,1}{709,1}$ | $\frac{23,3 \dots 27,0}{25,0}$ | $\frac{69,5 \dots 73,1}{70,8}$ | $\frac{75 \dots 120}{100,6}$ | $\frac{6,2 \dots 9,4}{7,7}$ |
| 2 | $\frac{520,1 \dots 520,8}{564,9}$ | $\frac{637,8 \dots 638,8}{638,5}$ | $\frac{26,7 \dots 27,7}{27,4}$ | $\frac{71,4 \dots 73,1}{72,0}$ | $\frac{39 \dots 50}{43}$ | $\frac{2,0 \dots 3,1}{2,4}$ |
| 3 | $\frac{562,0 \dots 568,9}{564,9}$ | $\frac{683,8 \dots 693,7}{688,2}$ | $\frac{24,0 \dots 25,3}{24,7}$ | $\frac{65,9 \dots 76,8}{66,6}$ | $\frac{48 \dots 59}{52,7}$ | $\frac{4,8 \dots 5,6}{5,2}$ |
| 4 | $\frac{572,4 \dots 598,5}{585,2}$ | $\frac{720,3 \dots 727,3}{722,6}$ | $\frac{25,7 \dots 26,7}{26,2}$ | $\frac{67,8 \dots 69,7}{69,1}$ | $\frac{36 \dots 46}{42,7}$ | $\frac{4,3 \dots 5,0}{4,6}$ |

Примечание. В числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние.



сталей. Установлено, что с увеличением доли пластической составляющей в изломе квазискола ударная вязкость возрастает.

3. Структурным фактором нестабильности свойств (в частности ударной вязкости при низких температурах) металла швов низколегированных сталей может являться как МАК-фаза, так и пластинчатые формы феррита, в частности феррит с УФВ.

4. Для получения стабильно высокой ударной вязкости металла швов при низких температурах необходимо, чтобы объемная доля МАК-фазы не превышала 5...6 %, а содержание феррита с УФВ было низким.

1. Влияние кислорода на образование структуры игольчатого феррита в низколегированном металле сварных швов (Обзор) / И. К. Походня, В. В. Головкин, А. В. Денисенко, В. Ф. Грабин // Автомат. сварка. — 1999. — № 2. — С. 3–10.
2. Ito G., Nakanishi M. Study on Charpy impact properties of weld metals with submerged arc welding. — S.I., [1975]. — 20 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XI-A-113-75).
3. Svensson L.-E., Grefott B. Microstructure and impact toughness of C-Mn weld metals // Welding Research Supplement. — 1990. — Dec. — P. 454–461.

4. Evans G. M. The effect of carbon on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits. — S.I., [1981]. — 16 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II-A-546-81).
5. Curry D. C., Knott J. F. Effects of microstructure on cleavage fracture stress in steel // Metal Sci. — 1978. — № 12. — P. 511.
6. Garland J. G., Kirkwood P. R. Towards improved submerged arc weld metal // Metal Construction. — 1975. — № 7. — P. 275–283.
7. Guidelines for the classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope // Welding in the World. — 1986. — 24, № 7/8. — P. 144–148.
8. Романов О. Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. — М.: Металлургия, 1979. — 176 с.
9. Ohkita S., Horii Y. Recent development in controlling the microstructure and properties of low alloy steel weld metals // ISIJ Intern. — 1995. — 35, № 10. — P. 1170–1182.
10. Evans G. M. The effect of heat-treatment on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits. — S.I., [1984]. — 13 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II-A-605-84).
11. Анализ структурного состава металла швов, выполненных сварочными проволоками ферритно-перлитного класса / В. Ф. Грабин, В. В. Головкин, Т. Г. Соломийчук и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 18–23.
12. Влияние никеля на структуру и механические свойства шва, выполненного электродами с основным покрытием / И. К. Походня, В. Д. Макаренко, А. О. Корсун, С. С. Миличенко // Там же. — 1986. — № 2. — С. 1–5.

Morphological features of microstructure of weld metal of ultra-low carbon steels have been studied. It is shown that in such welds both the MAC-phase and the lamellar forms of ferrite are the structural factor of property instability. It is found that in order to produce stable high properties at low temperatures, the volume fraction of MAC-phase should not exceed 5...6 % at a low content of ferrite with an ordered secondary phase. It is shown that the impact toughness of the studied welds rises with the increase in the ductile component fraction in fracture.

Поступила в редакцию 03.11.2004

23–27 марта 2005

СВАРКА и СТРОЙКА — 2005

Тематический раздел IV Международного фестиваля

IV Международный фестиваль
Строительство и архитектура 2005

Организаторы:
Киевская городская администрация,
АО «Киевская международная контрактная ярмарка»
ВЦ «КиевЭкспоПлаза»,
Киев, ул. Салютная, 2-Б

Организатор: НТК «ИЭС им. Е. О. Патона»
Тел.: +380(44) 227 1238, 490 5745
e-mail: expo@paton-expo.kiev.ua

ул. Боженко, 11, Киев, 03680
Факс: +380(44) 227-6502
<http://www.paton-expo.kiev.ua>

Основные направления тематического раздела:

- Материалы для строительных конструкций.
- Проектирование сварных строительных конструкций.
- Оборудование, материалы и технологии для сварки, наплавки, резки.
- Антикоррозионные, упрочняющие, декоративные и др. виды покрытий.
- Изделия из полимерных материалов и способы их соединений.
- Оценка ресурсов строительных конструкций.
- Диагностика и новые методы контроля качества.
- Охрана труда и средства защиты.

Подробности об условиях участия в выставке на сайте www.paton-expo.kiev.ua.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР В МЕТАЛЛЕ ШВА

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

Численным методом выполнена оценка характера влияния гидростатического давления, скорости перемещения фронта кристаллизации сварочной ванны и концентрации водорода в жидком металле при мокрой сварке под водой на значение критического радиуса газового зародыша. Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния условий подводной сварки на склонность к образованию пор.

Ключевые слова: подводная сварка, поры, скорость кристаллизации, водород, давление, газовый зародыш

Пористость является одним из наиболее часто встречаемых дефектов швов, выполненных под водой. В ряде случаев это приводит к ограничению применения подводной сварки. Несмотря на важность указанной проблемы, вопросы порообразования и влияния факторов, присущих сварке непосредственно в воде, изучены недостаточно и остаются актуальными. Одним из шагов в этом направлении является математическая модель [1], позволяющая описывать физические процессы, которые происходят в приповерхностном слое перед фронтом кристаллизации (зоне, прилегающей к межфазной границе) в условиях сварки под водой, и дает возможность изучить закономерности эволюции образовавшихся здесь газовых пузырьков и определить основные параметры физических процессов, обуславливающих дальнейший рост или коллапс зародышей в сварочной ванне. При создании модели были приняты следующие допущения:

фронт кристаллизации — плоская поверхность с постоянной скоростью распространения;

перенос водорода осуществляется только диффузионным путем;

жидкость идеальная, несжимаемая и спокойная на бесконечности при отсутствии тепловой конвекции;

растворенные в жидкости примеси не влияют на физические параметры жидкой среды;

газовый пузырек однородный, сферический.

Проведенные с учетом принятых допущений численные исследования позволили сделать следующие выводы:

критические параметры газового пузырька, при которых скорость роста его размеров равна нулю, главным образом определяются внешним гидростатическим давлением P_a , скоростью фронта кристаллизации v_s и временем образования полости t_0 . Критическое состояние является неустойчивым: незначительное возмущение в параметрах пузырька приводит к неминуемому росту или схлопыванию полости;

динамика роста пузырька определяется моментом его зарождения. Чем позже образовался пузырек, тем раньше поле концентрации в приповерхностном слое достигает большого размера, что в итоге увеличивает количество водорода, диффундирующего в полость пузырька, и способствует росту последнего;

динамические характеристики газового пузырька перед фронтом кристаллизации в значительной мере зависят от скорости движения плоского фронта практически во всем диапазоне возможных начальных радиусов газового пузырька. С увеличением скорости кристаллизации диффузионные процессы протекают быстрее, происходит смещение критических параметров газовых зародышей в область меньших размеров.

Исследования показали, что в диапазоне параметров, характеризующих процесс сварки под водой (глубина, скорость кристаллизации, концентрация водорода), существуют определенные значения радиусов газовых пузырьков, при которых скорость их роста равна нулю. В случае незначительного увеличения радиуса (при прочих неизменных параметрах) диффузионный баланс нарушается, и газовый пузырек начинает увеличиваться. В то же время незначительное уменьшение радиуса приводит к сжатию полости и последующему ее исчезновению. Критический радиус соответствует неустойчивому состоянию газового пузырька.

На основании полученных результатов можно оценить вероятность образования газовых пузырьков (полостей) в приповерхностном слое (рис. 1). Схема качественно отражает очевидную закономерность более вероятного образования зародышей

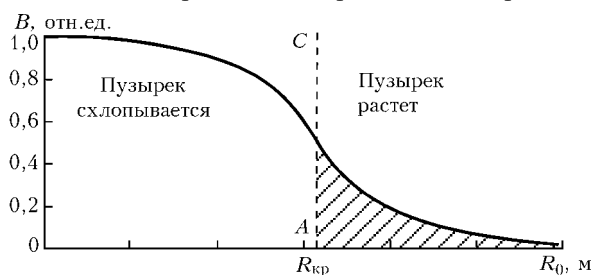


Рис. 1. Вероятность B образования газовой полости перед фронтом кристаллизации жидкого металла

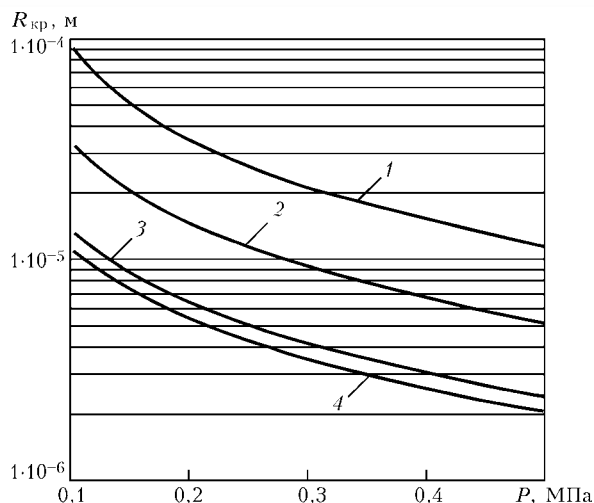


Рис. 2. Зависимость критического радиуса газового пузырька от внешнего давления при различных скоростях фронта кристаллизации: 1 – $v_s = 0,0005$; 2 – $0,001$; 3 – $0,002$; 4 – $0,005$ м/с

малого размера. Однако мелкие полости схлопываются, а большие, наоборот, растут. Существование критического радиуса (линия AC) определяет область (на рисунке она заштрихована), площадь которой пропорциональна вероятности появления полостей в процессе сварки. На основании численных исследований можно оценить характер влияния гидростатического давления, скорости перемещения фронта кристаллизации сварочной ванны и концентрации водорода в жидком металле на критический радиус газового зародыша. Это позволит сформулировать принципиальные подходы к выработке технологии сварки, согласно которой положение критического радиуса сместилось бы гораздо правее.

С помощью разработанной модели [1] исследовано влияние основных факторов, характеризующих специфику процесса мокрой сварки под водой, на критический радиус пузырька. При этом значения указанных факторов изменялись в диапазоне, характерном для условий подводной сварки.

На рис. 2 представлена зависимость критического радиуса пузырька от внешнего давления при различных скоростях перемещения фронта кристаллизации. С увеличением давления область критических параметров смещается в сторону меньших значений, т. е. склонность к образованию пор возрастает. Следует отметить, что увеличение скорости кристаллизации приводит к аналогичному результату.

Процесс сварки протекает определенное время, в течение которого приповерхностный слой обогащается водородом до максимального насыщения газом, что способствует смещению критических радиусов в сторону меньших значений (рис. 3). Отметим также следующую тенденцию: с течением времени каждая кривая критических параметров асимптотически приближается к некоторому положению, соответствующему моменту времени, при котором насыщение приповерхностного слоя уже завершилось. В соответствии с нашими расчетами максимальная концентрация водорода в жидком металле перед движущимся фронтом кристалли-

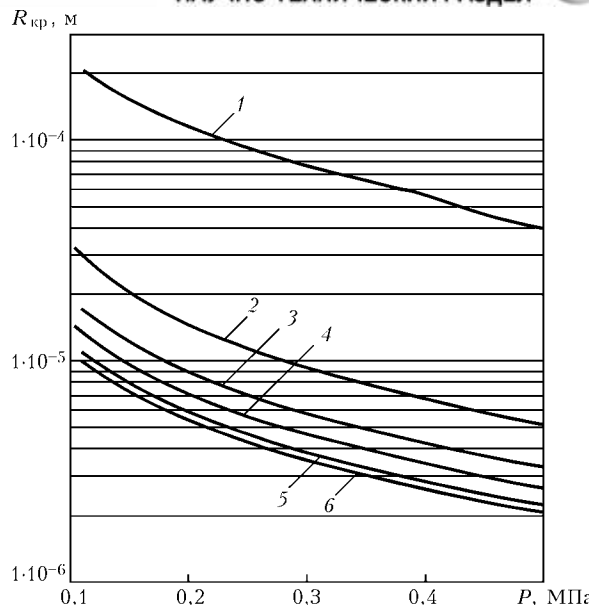


Рис. 3. Зависимость критического радиуса газового пузырька от внешнего давления при $v_s = 0,001$ м/с для различных моментов времени образования зародышей: 1 – $t_0 = 0$; 2 – $0,1$; 3 – $0,2$; 4 – $0,3$; 5 – $0,5$; 6 – $1,0$ с

зации достигается в течение примерно 1 с после начала его перемещения.

Полученные зависимости критических размеров газовых пузырьков от скорости передвижения фронта кристаллизации (рис. 4) позволяют оценить значение критического радиуса при изменении внешнего статического давления. С его увеличением в области значений, при которых еще справедлив закон Сиверта для растворимости газа в металле, кривые критических радиусов смещаются в область малых значений (рис. 4, а). Причем для каждой скорости кристаллизации имеется соответствующее значение критического радиуса. Картина нарушается при больших значениях давления (свыше 1 МПа), когда наступает стабилизация растворимости водорода в жидкой фазе. С уменьшением скорости кристаллизации наклон кривых равновесия стремится к нулю (рис. 4, б), и при некоторых ее значениях критические точки вовсе отсутствуют.

Зависимость критического радиуса полости от скорости фронта кристаллизации для различных моментов времени, но при неизменном внешнем давлении представлена на рис. 5. Здесь следует обратить внимание на то, что при малых скоростях значение критического радиуса практически не зависит от момента образования зародыша. Отсюда следует вывод о том, что низкие скорости кристаллизации являются менее благоприятными для широкого диапазона размеров зародышей, а значит, и количество пор в металле шва должно снизиться.

Для любого набора исходных параметров существует вполне определенное критическое значение размеров газового пузырька, образованного перед фронтом кристаллизации. С течением времени $R_{кр}$ стабилизируется и для данных условий сварки (P_a, v_s) остается неизменным.

На рис. 6 полученные результаты исследований представлены в виде зависимостей критического

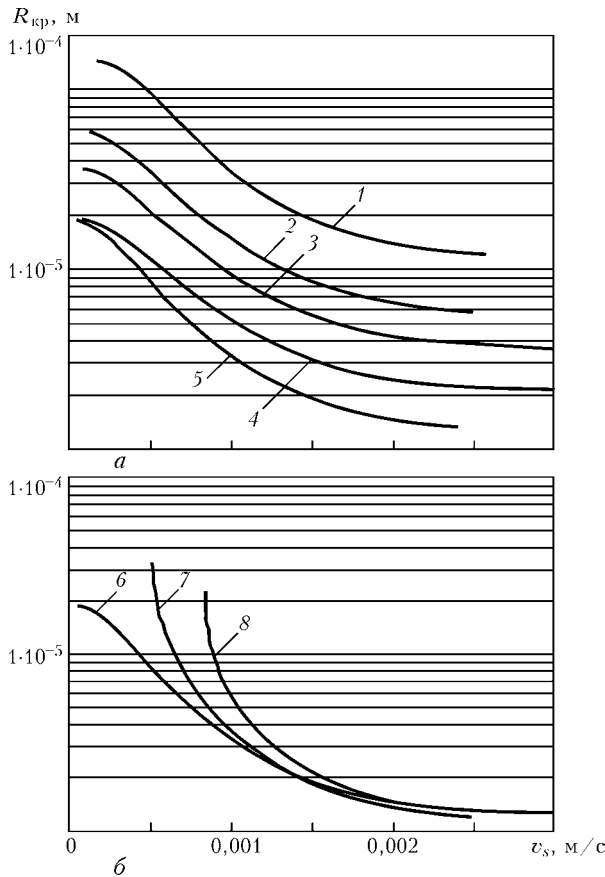


Рис. 4. Зависимость критического радиуса газового пузырька от скорости фронта кристаллизации при малых (а) и больших (б) значениях гидростатического давления: 1 — $P_a = 0,1$; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,5; 5, 6 — 1,0; 7 — 1,5; 8 — 2,0 МПа

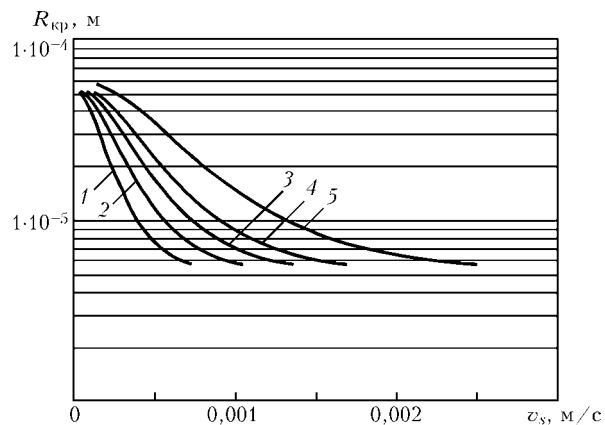


Рис. 5. Зависимость критического радиуса газового пузырька от скорости фронта кристаллизации для различных моментов времени образования зародыша при $P_a = 0,2$ МПа: 1 — $t_0 = 1,0$; 2 — 0,5; 3 — 0,3; 4 — 0,2; 5 — 0,1 с

радиуса газового пузырька от скорости кристаллизации, гидростатического давления и концентрации водорода в расплавленном металле в диапазоне значений, характерных для сварки под водой.

В случае содержания в расплавленной сварочной ванне $20 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ водорода (рис. 6, а) при скорости кристаллизации выше 7 м/ч ($2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$) возможно зарождение пузырьков радиусом $10 \dots 15 \text{ мкм}$. При замедлении процесса кристаллизации или повышении давления вероятность образования пор уменьшается, поскольку увеличи-

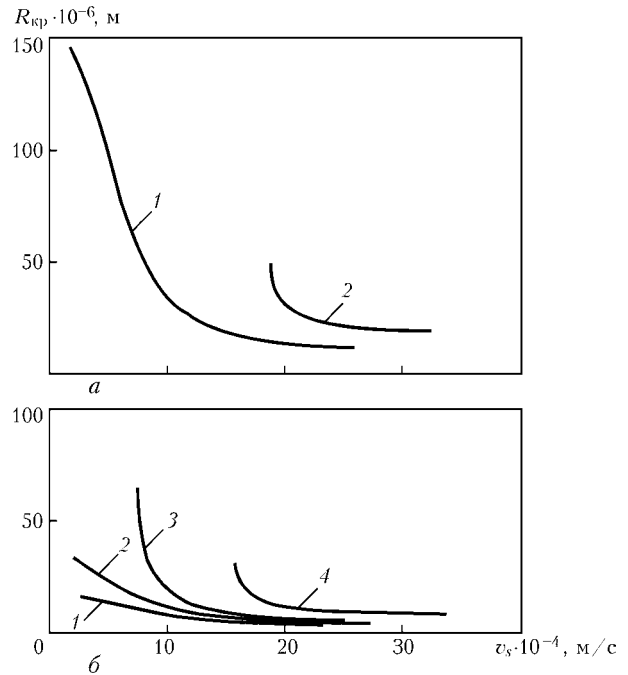


Рис. 6. Влияние давления на критический радиус газового пузырька при концентрациях водорода 20 (а) и 30 (б) $\text{см}^3/100 \text{ г}$: 1 — $P_a = 0,1$; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,5 МПа

вается критический радиус. Повышение в 1,5 раза концентрации водорода (рис. 6, б) приводит к уменьшению критических радиусов пузырьков примерно в 2 раза, эффект влияния давления снижается.

В зависимости от скорости кристаллизации существует определенный уровень давления, при котором вероятность образования пор резко снижается. Такому состоянию соответствует отрезок кривой, где угол наклона касательной к оси абсцисс приближается к 90° . Указанное давление повышается с увеличением содержания водорода. Наибольший эффект воздействия рассматриваемых факторов обнаружен в диапазоне малых скоростей кристаллизации, а при скорости свыше 7 м/ч их влияние практически нивелируется.

Приведенные выводы хорошо согласуются с результатами исследования характера пористости при мокрой сварке [2]. Изучение изломов образцов, сваренных рутитовыми и ильменитовыми электродами, показало наличие микропор диаметром $10 \dots 50 \text{ мкм}$ и отсутствие макропор. При снижении содержания водорода дополнительно обнаружено много макропор диаметром более $0,5 \text{ мм}$.

Увеличение скорости передвижения фронта кристаллизации приводит к смещению критических параметров газовых зародышей в область меньших размеров, т. е. при малых скоростях сварки диапазон размеров зародышей, которые с течением времени растут и при кристаллизации сварного шва приводят к образованию пор, уменьшается.

Однако во всех случаях с течением времени до зарождения пузырька диапазон размеров полостей, эволюция которых завершается образованием пор, увеличивается. Критические радиусы пузырьков асимптотически стремятся к значениям, соответствующим моменту времени, при котором



стабилизируется концентрация водорода в жидком металле в области, близкой к фронту кристаллизации.

Учет экспериментальной зависимости растворимости водорода в жидком металле с увеличением внешнего давления приводит к сложной зависимости критического радиуса от давления, при котором происходит сварка. На малых глубинах увеличение давления способствует смещению критического радиуса в область малых размеров газовых зародышей. При больших глубинах, для которых характерно повышение растворимости газа в металле, зафиксирована обратная тенденция: возрастание давления вызывает увеличение критического радиуса, дальнейшая эволюция которого приводит к образованию пор.

Поскольку в реальных условиях можно регулировать только два параметра (скорость кристаллизации и концентрацию водорода), то снижение пористости возможно лишь путем уменьшения их

значений. Одним из действенных путей реализации такого подхода может служить перемешивание расплавленного металла сварочной ванны. При этом воздействие оказывается на оба указанных фактора одновременно. С одной стороны, перемешивание способствует дегазации сварочной ванны, а с другой, — выравниванию температуры расплавленного металла по всему объему, тем самым вызывая понижение скорости кристаллизации. На практике при выполнении сварки под водой для этого можно использовать внешнее электромагнитное воздействие или применение поперечных колебаний конца электрода или сварочной горелки.

1. Максимов С. Ю., Гуржий А. А. Моделирование условий зарождения пор в металле шва при мокрой подводной сварке // Автомат. сварка. — 2004. — № 7. — С. 8–13.
2. Shiming L., Guorong W., Yonglun S., Zhifeng L. A study of microporosities in underwater wet welding. — S. l., [1987]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. CREAU 96–87).

A numerical method was used for evaluation of the influence of hydrostatic pressure, velocity of solidification front of weld pool motion and hydrogen concentration in molten metal in wet underwater welding on the value of critical radius of gas nuclei. Obtained results enable establishing the regularities of influence of underwater welding conditions on susceptibility to pore formation.

Поступила в редакцию 13.07.2004

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ-2005

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ
электротермия, сварка, резка, высокочастотные технологии
24–27 мая 2005 Санкт-Петербург

Среди разделов выставки

- ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ
 - ✓ плазменные системы для сварки и резки металлов
 - ✓ высокочастотные плазменные установки
 - ✓ установки коронного и тлеющего разряда
 - ✓ лучевые технологии и лазеры
- ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫЕ СИСТЕМЫ
 - ✓ технологии и оборудование для сварки в среде защитных газов
 - ✓ технологии и оборудование для сварки металлов давлением
 - ✓ технологии и оборудование для специализированных способов сварки и обработки материалов
- ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ
 - ✓ производство и применение металлических порошков при сварке, наплавке, напылении
- СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
 - ✓ Технологии и оборудование для сварки и термической резки металлов
 - ✓ Оборудование для обработки поверхности
 - ✓ Сварочные материалы и принадлежности
 - ✓ Автоматические системы управления
 - ✓ Роботы
 - ✓ Приборы, измерения, испытания, техническая диагностика, обработка данных
 - ✓ Неразрушающий контроль
 - ✓ Материалы и комплектующие изделия для производства электросварочного Оборудования

ЛЕНЭКСПО

Тел.: (812) 321 2631, 321 27 22
Факс: 321 27 22, 321 26 31
E-mail: averkina@mail.lenexpo.ru





ПОРООБРАЗОВАНИЕ В МЕТАЛЛЕ ШВА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ С ПОВЕРХНОСТНЫМ НАСЫЩЕНИЕМ ЗЕРЕН ФТОРОМ

В. Г. КУЗЬМЕНКО, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. И. ГУЗЕЙ, инж. (Киев. город. госадминистрация)

Исследованы свойства сварочных плавящихся флюсов марганец-силикатного типа, не содержащих фтора и подвергнутых фторированной термической обработке совместно с аммонийной солью фтористоводородной кислоты (NH_4F) и гексафторсиликатом магния (MgSiF_6). Установлено, что достаточная стойкость металла шва к порообразованию достигается при термообработке флюса с 0,5 % каждой из упомянутых выше солей. При этом содержание фтора во флюсе эквивалентно присутствию в нем 0,4 % CaF_2 . Эффект достигается за счет локального размещения фтора на поверхности зерен флюса.

Ключевые слова: электродуговая сварка, флюсы, газовая защита, пористость, фторированная термообработка, растворение азота

Пористость в сварных швах возникает вследствие избыточной растворимости в жидком металле в основном азота и водорода из окружающей газовой атмосферы, а также выделения этих газов при остывании и кристаллизации металла шва [1, 2]. Пористость при электродуговой сварке под флюсом можно предотвращать путем регулирования комплекса физических явлений, включающих шлаковую и газовую защиту сварочной ванны.

Шлаковая защита сварочной ванны основывается на общепринятом представлении о существовании герметичной шлаковой оболочки вокруг дуги, однако, как правило, только такой защиты не достаточно. В работе [3] показано, что в зоне преддугового фронта плавления основного металла и флюса происходит разрыв сплошности шлаковой оболочки вследствие быстрого смещения жидкого шлака под действием высокоскоростных газоплазменных потоков дуги, направленных в хвостовую часть сварочной ванны. В результате эффективность шлаковой защиты расплавленного металла снижается и увеличивается значимость газовой защиты.

Наилучшие результаты для снижения уровня растворимости газов и ограничения пористости металла шва при электродуговой сварке получены при введении в состав флюсов CaF_2 . Так, при добавлении в марганец-силикатный флюс 3...5 мас. % этой соли концентрация азота в металле сварного шва снижается в 2...3 раза [4] и соответственно увеличивается его стойкость к порообразованию. Первоначально считалось, что при введении фторидов во флюс повышение эффективности защиты от воздуха происходит за счет снижения вязкости шлака и, следовательно, более быстрого образования шлакового «укрытия» на поверхности сварочной ванны. В работе [5] установлена особая роль газообразного тетрафторида кремния SiF_4 ,

который образуется при взаимодействии CaF_2 и SiO_2 , содержащихся во флюсах. Особенности протекания этой реакции непосредственно между этими компонентами, а также в составе сварочных флюсов рассмотрены в работах [6–8]. Этот газ уже при нормальной температуре создает давление приблизительно 400 кПа (40 атм) [9] и при сварке достаточно быстро вытесняет воздух из зоны дуги.

Фтористый кальций в сварочных флюсах выполняют двойную функцию. С одной стороны, он влияет на такие физико-химические свойства флюсов, как температура плавления, вязкость, межфазное натяжение, электропроводность, активность компонентов, и через них оказывают металлургическое воздействие на металл; с другой — обеспечивает газовую защиту за счет образования SiF_4 . Здесь уместно заметить, что если необходимые физико-химические свойства обеспечиваются в результате равномерного распределения компонентов в объеме сварочных шлаков, то образование SiF_4 происходит на поверхности зерен флюса. Поверхностный характер выделения SiF_4 подтверждается данными работы [8], в которой с помощью метода потока исследована зависимость интенсивности образования этого газа от температуры. Нагрев флюсов осуществляли от 400 °С и до температуры плавления. Количество этого газа по мере нагрева монотонно увеличивалось, значительно возрастало непосредственно перед плавлением и резко снижалось после расплавления флюса. Поверхностный характер образования SiF_4 подтверждается также тем, что при нагреве из пемзовидных флюсов выделяется большая его доля, чем из стекловидных. Пемзовидные флюсы обеспечивают также более высокую стойкость металла шва против образования пор при сварке.

Если сравнить интенсивность выделения SiF_4 из частей засыпки флюса, находящихся в отдельных зонах сварочной ванны (рис. 1), следует, что его максимальное количество будет образовываться в преддуговой области на переднем фронте плавления металла, т. е. именно там, где имеет место разрыв сплошности шлаковой оболочки сварочной

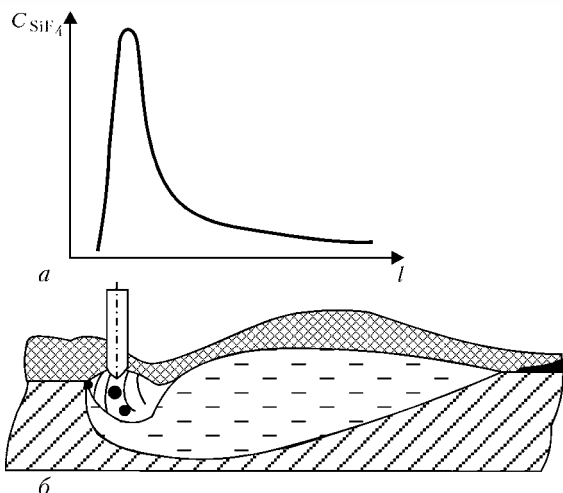


Рис. 1. Интенсивность выделения SiF_4 (а) из различных частей засыпки флюса, находящихся в отдельных зонах сварочной ванны (б) [6]: l — длина сварочной ванны

ванны. Учитывая наибольшую вероятность проникновения воздуха в сварочную ванну именно в этой зоне, можно прийти к заключению о целесообразности интенсифицировать процесс образования SiF_4 на поверхности зерен флюсов. Существующая технология, в соответствии с которой обеспечивается равномерное распределение фтора в объеме зерен флюса, не позволяет локально увеличивать его поверхностную концентрацию.

Ранее нами исследовано влияние фторирующей обработки флюсов на изменение характера их гидратации [10]. Образование барьерного слоя из фторидов на поверхности зерен флюса существенно снижает склонность последнего к влагопоглощению. Можно предположить, что повышенное содержание фторидов в поверхностном слое зерен флюса может также повлиять на процесс поробразования в металле шва при сварке.

При термической обработке газообразным фтористым водородом на поверхности зерен флюсов образуется слой, обогащенный фтором и обедненный кислородом. Очевидно, что такая обработка флюсов, содержащих кремнезем, создает условия для его более энергичного взаимодействия с фторидами и таким образом процесс образования газообразного тетрафторида кремния будет более интенсивным. Влияние фторирующей термической обработки флюсов на стойкость металла шва против образования пористости от ржавчины исследовано нами экспериментально. Для этого в электрической флюсоплавильной печи выплавляли бесфтористый флюс марганец-силикатного типа, близкий по составу к стандартному флюсу марки АН-60. Этот флюс подвергали фторирующей термической обработке в закрытой емкости вместе с 1,5; 3,0 и 4,5 мас. % фторида аммония NH_4F при температуре 500°C в течение 30 мин. Химический состав бесфтористого флюса и флюсов, полученных после фторирующей термической обработки, приведен в табл. 1.

По общепринятой технологии (с введением CaF_2 в переплавляемую шихту) были изготовлены контрольные флюсы аналогичного типа с различным и близким содержанием фтора к фторированным

Таблица 1. Химический состав (мас. %) бесфтористого флюса и флюсов, полученных с применением фторирующей термической обработки

| Массовая доля NH_4F во флюсе, % | SiO_2 | CaF_2 | CaO | MnO | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | S | P |
|---|----------------|----------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| 0 (АН-60) | 46,2 | — | 9,4 | 37,2 | 4,0 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| 1,5 | 46,1 | 1,3 | 7,7 | 37,3 | 4,2 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| 3,0 | 45,4 | 2,7 | 6,5 | 37,4 | 4,1 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| 4,0 | 45,8 | 3,8 | 6,2 | 36,8 | 3,9 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |

Таблица 2. Химический состав (мас. %) флюсов марганец-силикатного типа с различным содержанием CaF_2

| Массовая доля CaF_2 во флюсе, % | SiO_2 | CaF_2 | CaO | MnO | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | S | P |
|--|----------------|----------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| 2,0 | 46,2 | 1,4 | 9,8 | 38,7 | 4,3 | 0,04 | 0,02 | 0,03 |
| 3,0 | 45,9 | 2,3 | 9,9 | 38,3 | 4,3 | 0,03 | 0,03 | 0,02 |
| 4,5 | 45,7 | 3,9 | 10,3 | 38,4 | 4,2 | 0,03 | 0,03 | 0,02 |
| 6,0 | 45,5 | 5,0 | 9,8 | 38,2 | 4,3 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |

флюсам. Химический состав этих флюсов приведен в табл. 2.

С использованием фторированных и контрольных флюсов осуществляли наплавку на пластину из стали Ст3 толщиной 16 мм с канавками, заполненными дозированным количеством воздушно-сухой ржавчины [4]. Масса ржавчины на 100 мм, при которой в наплавленном металле образовывались поры, принималась в качестве порога пористости. Наплавку выполняли с помощью проволоки Св-08А диаметром 4 мм на следующем режиме: сварочный переменный ток $I_{\text{св}} = 750...800$ А; напряжение на дуге $U_{\text{д}} = 37...40$ В; скорость сварки $v_{\text{св}} = 25$ м/ч.

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Во флюсы, обозначенные кривой 1, фтор вводился

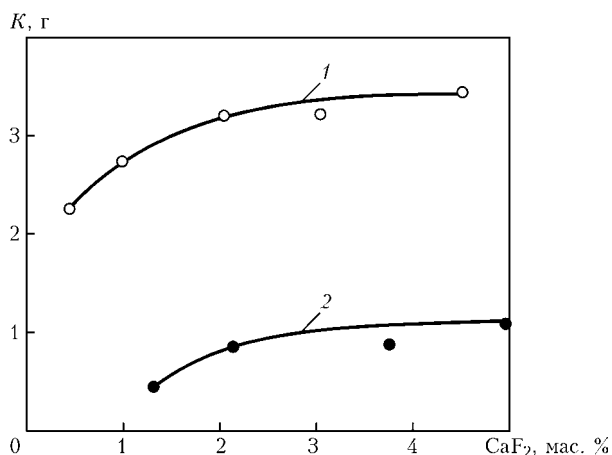


Рис. 2. Склонность металла швов к образованию пор при сварке под плавными флюсами, изготовленными по различным технологиям, в зависимости от содержания CaF_2 в их составе: 1 — поверхностно-фторированные (ПФ) флюсы (см. табл. 1); 2 — флюсы, изготовленные посредством сплавления всех компонентов в электрической печи (см. табл. 2); K — масса ржавчины на 100 мм длины шва



Таблица 3. Химический состав (мас. %) исходного и фторированных флюсов, полученных в результате термической обработки с ограниченной массовой долей NH_4F

| Массовая доля NH_4F во флюсе, % | SiO_2 | MnO | CaF_2 | CaO | Fe_2O_3 |
|-----------------------------------|---------|-------|---------|-------|-----------|
| 0 (АН-60) | 45,3 | 36,5 | — | 8,9 | 0,28 |
| 0,4 | 45,1 | 36,9 | 0,22 | 7,9 | 0,26 |
| 0,6 | 45,0 | 36,7 | 0,48 | 8,2 | 0,23 |
| 1,0 | 44,8 | 37,2 | 0,84 | 7,7 | 0,22 |
| 1,5 | 44,3 | 36,9 | 1,28 | 7,9 | 0,32 |

через газовую фазу посредством фторирующей обработки, а кривой 2 — по общепринятой технологии (путем введения в шихту). При использовании фторированных флюсов количество ржавчины, при котором в металле шва появлялись поры, в 3...5 раз превосходило этот показатель для флюсов, изготовленных по общепринятой технологии. По-видимому, столь высокие показатели обусловлены более интенсивным образованием тетрафорида кремния вследствие нахождения соответствующих реагентов на поверхности зерен флюсов. Для получения сбалансированных показателей стойкости металла шва против пористости и количества образующихся газообразных фторидов с применением метода фторирования нами изготовлена серия марганец-силикатных флюсов с более низким содержанием фтора. Химический состав бесфтористого и фторированных флюсов, полученных с введением меньшего количества NH_4F , приведен в табл. 3.

Методом потока с титриметрическим окончанием определяли массовую долю SiF_4 , выделившегося из фторированных флюсов (табл. 3) и стандартного флюса АН-60 при нагреве в температурном интервале 600...900 °С. Представленные на рис. 3 результаты показали, что из флюсов, прошедших фторирующую обработку 0,5 % NH_4F , выделяется SiF_4 больше, чем из стандартных. Из этого следует, что вполне реально получить флюсы с существенно низким содержанием фтора, размещенным на поверхности их зерен, обеспечивающие равноценную со стандартным флюсом АН-60 стойкость металла шва против пористости. С целью

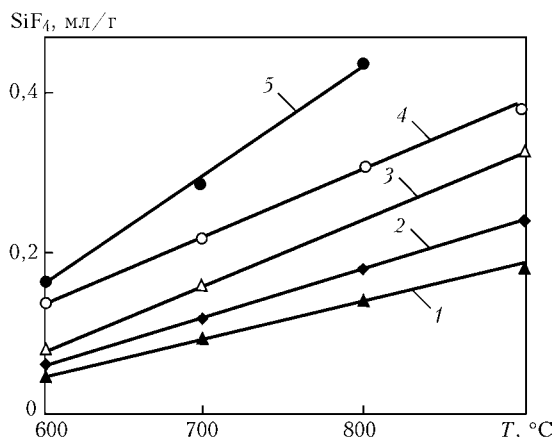


Рис. 3. Влияние температуры на интенсивность выделения SiF_4 из флюсов с различным содержанием CaF_2 , мас. %: 1 — 0,22 (ПФ); 2 — 5,70 (АН-60); 3 — 0,84 (ПФ); 4 — 0,84 (ПФ); 5 — 1,28 (ПФ)

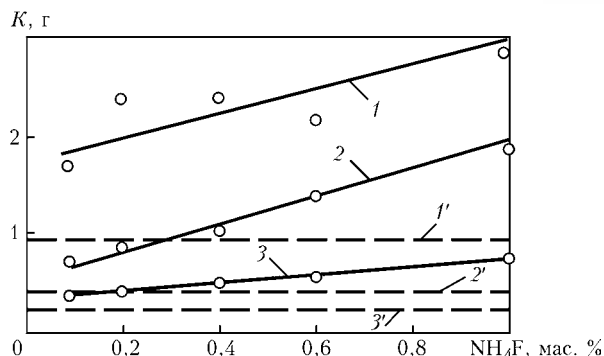


Рис. 4. Склонность металла шва к образованию пористости при сварке на различных скоростях с использованием ПФ флюсов (см. табл. 3) от содержания NH_4F , применяемого для их фторирующей обработки: 1, 1' — $v_{св} = 30$; 2, 2' — 34,5; 3, 3' — 40 м/ч; 1-3 — ПФ флюсы; 1'-3' — АН-60

проверки этого предположения исследовали стойкость металла швов против пористости от ржавчины при сварке с использованием фторированных флюсов по описанной ранее методике. Эти флюсы получены путем нагрева пемзовидного бесфтористого марганец-силикатного флюса с 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 и 1,0 мас. % NH_4F . Наплавку выполняли со скоростью 30,0; 34,5 и 40,0 м/ч. Проведены также контрольные испытания с применением стандартного флюса АН-60. Результаты экспериментов приведены на рис. 4. При всех использованных вариантах изменения содержания NH_4F свыше 0,48 мас. % в смеси при фторирующей обработке и всех скоростях сварки фторированные флюсы показали более высокую стойкость швов против образования пористости от ржавчины, чем стандартный флюс АН-60. Этот показатель повышался по мере увеличения массовой доли NH_4F в смеси.

Кроме газообразного HF (продукта термического разложения NH_4F), в качестве фторирующего реагента может использоваться и газообразный SiF_4 . При этом источником этого газа может гексафторсиликат магния $MgSiF_6$. Бесфтористый флюс типа АН-60 (см. табл. 3) обрабатывали по ранее использованной методике в смеси с $MgSiF_6$ при температуре 500 °С. Массовая доля соли в смеси с флюсом в пересчете на SiF_4 составляла 0,25; 0,50; 0,75 и 1,00 %. С использованием полученных таким образом флюсов по описанной ранее методике определяли стойкость швов против пористости от ржавчины. Условия проведения опы-

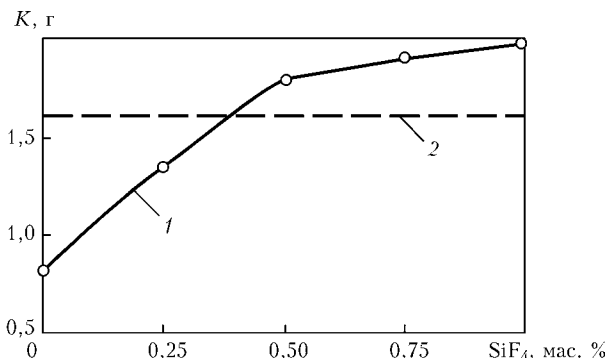


Рис. 5. Зависимость стойкости металла швов против образования пористости при сварке с использованием ПФ флюсов от содержания SiF_4 , полученного при термическом разложении $MgSiF_6$ в смеси с бесфтористым флюсом: 1 — ПФ флюс; 2 — АН-60



Таблица 4. Эффективность использования фтора во флюсах при сварке

| Массовая доля NH_4F во флюсе, % | Массовая доля CaF_2 , % | | ΔF^- , % | $\Delta\text{F}^-/\text{F}^-$, % | Порог образования пористости |
|---|----------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| | во флюсе | в шлаковой корке | | | |
| 0 (АН-60) | 5,70 | 4,84 | 0,43 | 15,1 | 0,4 |
| 0,4 | 0,22 | 0,10 | 0,06 | 54,4 | 1,0 |
| 0,6 | 0,48 | 0,17 | 0,16 | 66,6 | 1,3 |
| 1,0 | 0,84 | 0,28 | 0,29 | 69,0 | 1,8 |
| 1,5 | 1,28 | 0,32 | 0,46 | 71,8 | 2,4 |

Примечание. ΔF^- — массовая доля выделившегося фтора; F^- — общая массовая доля фтора во флюсе.

тов и используемые материалы были аналогичными, применявшимся ранее (за исключением $v_{\text{св}} = 21,5 \text{ м/ч}$). Результаты опытов представлены на рис. 5. Показатели стойкости швов против пористости от ржавчины, равноценные с флюсом АН-60, получены при использовании опытного флюса, обработанного 0,4 мас. % SiF_4 . Дальнейшее увеличение содержания реагента при фторирующей обработке к существенному повышению стойкости металла шва против порообразования не приводило.

Повышение интенсивности образования SiF_4 при сварочном нагреве фторированных флюсов должно способствовать более полному использованию фтора при сварке. Для оценки значения этого показателя выполняли наплавку с применением опытных флюсов, полученных обработкой 0,4; 0,5; 1,0 и 1,5 мас. % NH_4F и стандартного флюса АН-60, а затем находили содержание фтора в исходном флюсе и шлаковой корке.

Эти данные представлены в табл. 4 и на рис. 6. Как следует из них, эффективность использования фтора ПФ флюсов значительно превышает этот показатель у стандартных флюсов.

Таким образом, в результате фторирующей обработки флюсов стойкость металла шва против образования пористости при сварке значительно повышается. Однако эффект достигается при содержании фтора более чем в 10 раз ниже, чем то, которое обеспечивается флюсами, изготовленными по общепринятой технологии.

Использование аммонийных солей фтористоводородной кислоты в качестве HF-образующего реагента при фторирующей термической обработке сварочных флюсов может приводить к увеличению в их составе содержания азота за счет термического разложения аммиака. В свою очередь это может способствовать переходу азота из флюса в металл шва при сварке. На рис. 7 представлены результаты определения содержания азота в стандартном флюсе АН-60 и флюсах типа ПФ, но изготовленных с применением технологии фторирования посредством введения фторида аммония в смесь с флюсом в пределах от 0 до 1,5 % и последующей термической обработке. Как видно из рисунка, содержание азота во флюсе по мере увеличения фторида аммония в смеси незначительно возрастает, по сравнению со стандартным флюсом АН-60, и составляет 0,011... 0,016 мас. %. Тем не менее, нами проведена определяющая проверка посредством выполнения контрольных сварок и определения содержания азота в металле шва. В этих экспериментах оценивали также влияние азота воздуха на насыщение им металла шва при сварке посредством использования флюсов с различной насыпной массой. Результаты экспериментов приведены на рис. 8. Из них следует, что растворение азота в металле шва за счет применения флюсов, обработанных фторидом аммония, невелико и значительно менее существенно, чем его азотирование за счет азота воздуха.

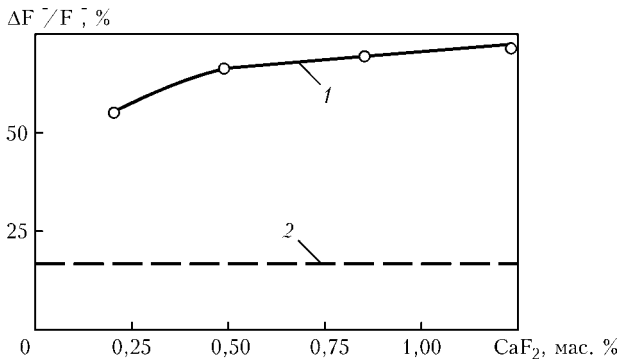


Рис. 6. Эффективность использования фтора при сварке под флюсами типа ПФ (1) и АН-60 (2)

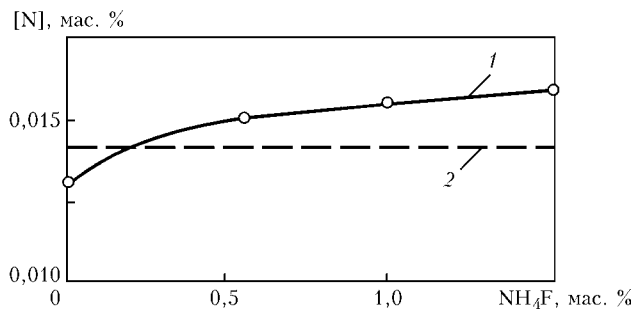


Рис. 7. Зависимость содержания азота в ПФ флюсах от содержания фторида аммония (1, 2 — см. рис. 6)

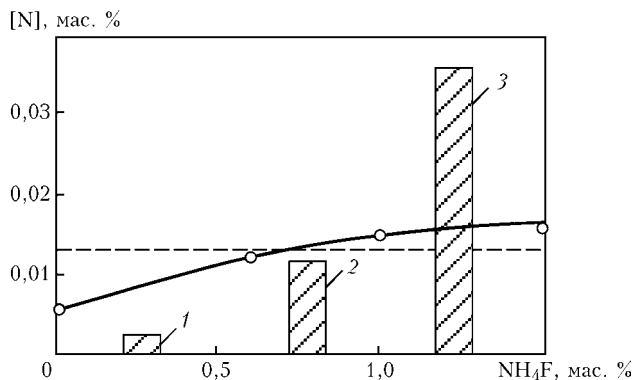


Рис. 8. Зависимость содержания азота в металле шва, полученном с использованием ПФ флюсов с насыпной массой 1,3 (1), 1 (2), 0,7 кг/дм³ (3), в зависимости от содержания NH_4F : сплошная кривая — ПФ флюсы; штриховая — АН-60



Выводы

1. Отсутствие полноценного шлакового «укрытия» сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом требует усиления газовой защиты металла шва с целью предотвращения образования в нем пористости.

2. Увеличение содержания фтора в поверхностном слое зерен марганец-силикатных флюсов при общем его содержании в пересчете на CaF₂ равное 0,5...1,5 %, способствует образованию SiF₄ при нагреве в условиях сварки.

3. Высокотемпературные, бесфтористые, пемзовидные флюсы, подвергнутые фторирующей термической обработке при 500 °С в смеси с 0,5 мас. % NH₄F или с тем же количеством MgSiF₆, имеют стойкость против образования пористости от ржавчины при сварке, равноценную со стандартным флюсом АН-60.

1. Подгаецкий В. В., Люборец И. И. Сварочные флюсы. — Киев: Техника, 1984. — 167 с.

2. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
 3. Кузьменко В. Г. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1998. — № 3. — С. 14–19.
 4. Любавский К. В. Металлургия автоматической сварки малоуглеродистой стали под флюсом // Вопросы теории сварочных процессов. — М.: Машгиз, 1948. — С. 86–214.
 5. Подгаецкий В. В. Реакции в атмосфере дуги при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1953. — № 1. — С. 10–12.
 6. Подгаецкий В. В., Новикова Т. П. О выделении фтористого кремния при нагреве флюса в процессе сварки и сушки // Там же. — 1960. — № 6. — С. 19–22.
 7. Bratland D., Fekri A. et al. Vapour pressure of silicon tetrafluoride above mixtures of fluorides and silica // Acta Chemica Scandinavica. — 1970. — № 24. — P. 846–870.
 8. Кузьменко В. Г. Особенности реакции в смесях фтористого кальция и кремнезема // Автомат. сварка. — 1980. — № 4. — С. 33–35.
 9. Рыс И. Г. Химия фтора и его неорганических соединений. — М.: Госхимиздат, 1956. — 718 с.
 10. Кузьменко В. Г., Гузей В. И. Гидратация флюсов с локально измененным химическим составом зерен // Автомат. сварка. — 2004. — № 6. — С. 44–46.

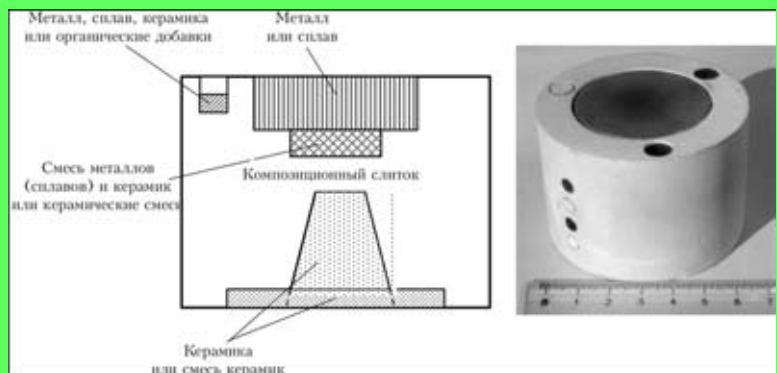
Properties were studied of fused welding fluxes of manganese-silicate type, not containing fluorine and subjected to fluorinating heat treatment together with ammonia salt of hydrofluoric acid (NH₄F) and magnesium hexafluosilicate (MgSiF₆). It is established that the weld metal resistance to pore formation is achieved, when using 0.5 % each of the above salts for flux treatment. Fluorine content in the flux is equivalent to adding 0.4 % CaF₂ to it. The effect is achieved due to local arrangement of fluorine on the flux grain surfaces.

Поступила в редакцию 26.03.2004

**ОДНОСТАДИЙНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
НАНЕСЕНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

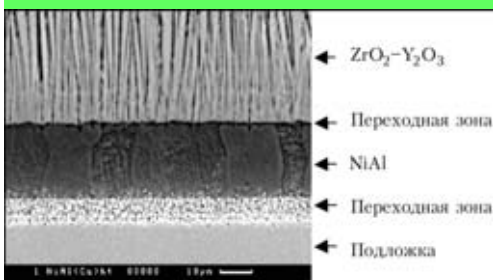
Одностадийная электронно-лучевая технология осаждения термобарьерных градиентных покрытий на лопатки газовых турбин базируется на использовании композиционного слитка и испарителя карусельного типа.

Применение этой технологии позволяет, используя одну электронно-лучевую установку, наносить термобарьерное градиентное покрытие, включающее связующий металлический слой, переходные зоны и внешний керамический слой, полностью за один технологический цикл.



Строение и внешний вид композиционного керамического слитка, используемого для осаждения термобарьерных градиентных покрытий

Композиционный керамический слиток содержит программу испарения и осаждения термобарьерного градиентного покрытия в зависимости от формы, размеров и количества соответствующих вставок, их состава и расположения внутри слитка. Вставки определяют состав, структуру и свойства всех уровней термобарьерного градиентного покрытия.



Микроструктура поперечного сечения термобарьерного градиентного покрытия

03150, Украина, Киев-150, ул. Горького, 68
 ИЭС им. Е.О. Патона, отд. № 13
 Тел./факс: (38044) 227 31 66
 E-mail: movchan@paton-icebt.kiev.ua
 http://www.paton-icebt.kiev.ua



ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ОСТАТОЧНУЮ НАПРЯЖЕННОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

В. А. ШОНИН, канд. техн. наук, **О. И. ГУЦА**, д-р техн. наук, **В. С. МАШИН**, **В. С. КОВАЛЬЧУК**, кандидаты техн. наук, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты оценки остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях алюминиевого сплава АД33 (6061) толщиной 6 мм на образцах различной ширины (70...600 мм), полученных способами сварки ТИГ и МИГ. С помощью экспериментов показано влияние продольных и поперечных растягивающих остаточных напряжений на прочность и долговечность сварных образцов с поперечным швом при осевой нагрузке.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, стыковые сварные соединения, сопротивление усталости, прочность, долговечность, сварочные остаточные напряжения, концентрация напряжений, размеры образца

Для установления расчетных сопротивлений усталости сварных соединений преимущественно используют данные испытаний на осевую циклическую нагрузку однотипных крупногабаритных или лабораторных образцов, в которых максимально учтены факторы, свойственные сварным конструкциям [1–9]. В ряде случаев применяют также образцы малой ширины (сваренные по отдельности или вырезанные из большой заготовки), которые воспроизводят в общем виде форму и структурное состояние соединений, характерных для используемых способов и режимов сварки. Однако до настоящего времени при выборе размеров образцов для усталостных испытаний не существует определенной ясности в отношении учета остаточной напряженности.

Анализ проблемы. Наличие остаточных напряжений в металлоконструкциях является следствием [10–16] неравномерного термического воздействия в условиях сварки плавлением. Остаточные напряжения образуются в результате продольного и поперечного укорочения металла при его охлаждении после пластического теплового сжатия в зоне термического влияния (ЗТВ) и усадке шва. Уровень продольных и поперечных остаточных напряжений возрастает с уменьшением размеров активного температурного поля относительно длины, ширины и толщины свариваемых пластин [15, 16]. Поэтому характер распределения сварочных остаточных напряжений зависит не только от размеров соединяемых деталей, но и от способа сварки. Причем на сопротивление усталости оказывают влияние поверхностные остаточные напряжения в зоне геометрического концентратора напряжений, характер распределения которых определяется продольной и поперечной составляющими.

Применительно к сварным соединениям алюминиевых сплавов ранее [5, 17–19] экспериментально установлено, что в сочетании с геометрическим концентратором напряжений наибольшее

повреждающее влияние оказывают остаточные напряжения того направления, которое совпадает с напряжениями внешнего нагружения. Причем долговечность поперечных соединений с необработанными швами заметно снижается при увеличении уровня поперечных по отношению к шву растягивающих остаточных напряжений. Их действие подобно статической составляющей циклических напряжений, которое обуславливает увеличение эффективного коэффициента асимметрии цикла в зоне концентратора напряжений [3].

В сварных образцах большой ширины со сплошными швами высокие поперечные растягивающие остаточные напряжения (в средней части образца) образуются при увеличенном тепловложении и малой скорости сварки (например, ручная сварка ТИГ). Они уравновешены в пределах всей ширины пластины в продольном сечении шва. Уровень этих поперечных растягивающих остаточных напряжений в ЗТВ достигает максимального значения при размере пластины более 500×500 мм [10, 13, 14]. Подобные условия образования высоких поперечных растягивающих остаточных напряжений характерны и для случая выполнения коротких швов, у которых длина значительно меньше ширины пластины (например, приваривание деталей небольших размеров к основному элементу).

Поперечные растягивающие остаточные напряжения высокого уровня в поверхностных слоях металла ЗТВ образуются также и при выполнении многослойных швов (более четырех проходов) в толстостенных элементах конструкций [5, 11]. Однако в этом случае остаточные напряжения уравновешены в пределах толщины металла и мало зависят от ширины и длины свариваемых пластин.

При всех вариантах сварки плавлением продольные растягивающие остаточные напряжения, уравновешенные в поперечном сечении соединения, имеют более высокие значения, чем поперечные растягивающие остаточные напряжения. Они не снижают долговечность соединений с неснятой выпуклостью шва при циклической нагрузке вдоль шва, вследствие минимальной концентрации напряжений в этом направлении. Повреждающее вли-

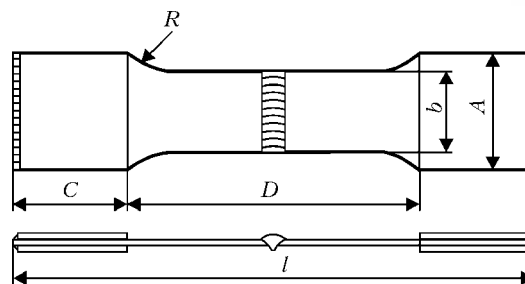


яние продольных растягивающих остаточных напряжений максимально в соединениях с пересекающимися швами [1], когда продольный шов выполнен последним, что обуславливает наведение растягивающих остаточных напряжений поперек предыдущего шва. Такие случаи не типичны для сварных конструкций. При действии внешних напряжений поперек шва роль продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений выяснена не достаточно.

Неполнота данных о характере распределения поперечных и продольных остаточных напряжений в испытуемых на усталость образцах и реальных конструкциях, а также нечеткая интерпретация экспериментальных данных об их влиянии на долговечность нашли отражение в нормах расчета прочности стальных конструкций [7, 9], в которых не конкретизируется направленность продольной и поперечной составляющих растягивающих остаточных напряжений по отношению к напряжениям внешнего нагружения. Такой упрощенный подход, основанный на максимальном повреждающем влиянии растягивающих остаточных напряжений, предлагается использовать и при составлении норм расчета алюминиевых конструкций [20]. При этом не учитываются возможности совершенствования проектирования сварных конструкций путем создания в них более благоприятного сочетания остаточных напряжений с напряжениями внешней нагрузки [15]. Применение высокопроизводительных способов сварки напроход, при которых имеет место значительное сужение ЗТВ, является основным условием существенного снижения поперечных растягивающих остаточных напряжений в соединениях алюминиевых конструкций [6].

В связи с этим возникла необходимость оценки влияния реальных остаточных напряжений, вызванных изменением размеров образца сварного соединения и способа сварки, при условии, если продольная составляющая значительно превышает поперечную составляющую остаточного напряжения. Это необходимо для установления достаточных для усталостных испытаний размеров образцов сварных соединений алюминиевых сплавов, выполняемых высокопроизводительными способами сварки плавлением, и получения ответа на вопрос об обоснованности применения дополнительных мер по наведению поперечных растягивающих остаточных напряжений в сварном соединении.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния размеров сварного образца на сопротивление



| Размеры, мм | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|----|
| b | A | l | C | D | R |
| 70 | 90 | 600 | 100 | 300 | 60 |
| 200 | 250 | 900 | 200 | 500 | 60 |
| 500 | 550 | 900 | 200 | 650 | 60 |

Рис. 1. Сварные образцы для усталостных испытаний

усталости стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов во взаимосвязи с поперечной и продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений в случае применения высокопроизводительных способов дуговой сварки ТИГ и МИГ.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили на образцах стыковых соединений сплава АДЗЗТ1 (6061 Т6) толщиной 6 мм. Общий вид образца для усталостных испытаний и его размеры представлены на рис. 1. Заготовки образцов сваривали отдельно поперек направления проката без скоса кромок за один проход в нижнем положении. Образцы шириной 200 и 500 мм сваривали по одной заготовке, а шириной 70 мм – в одном пакете из 3...6 заготовок с выводом начального и конечного участков шва на технологические планки. При этом применяли два способа автоматизированной сварки – плавящимся электродом (МИГ) в смеси инертных газов (Ar + He) и неплавящимся (ТИГ) в аргоне. Соединения выполняли с использованием сварочной проволоки диаметром 1,6 мм из сплавов СвАМг5 и СвАК5. Сварку МИГ осуществляли углом вперед с наклоном электрода под углом 80° к оси шва. Подготовка кромок под сварку отвечала требованиям стандарта NFA 87010. Для формирования выпуклости с обратной стороны шва использовали стальную подкладку (в соответствии с рекомендациями стандарта NFA 89220). Качество швов было не ниже второго класса. Для сварки МИГ использовали источник питания постоянного тока ВДУ-506 (номинальный сварочный ток 500 А), преобразователь импульсного тока ОИ-122 и сварочный аппарат А-1431. Сварку ТИГ осуществляли от ис-

Таблица 1. Режимы сварки

| Способ сварки | Тип сварочной проволоки | Сварочный ток $I_{св}$, А | Напряжение на дуге U_d , В | Скорость подачи сварочной проволоки $v_{пр}$, м/ч | Скорость сварки $v_{св}$, м/ч | Расход газа, л/мин | |
|---------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------|--------------------|-------|
| | | | | | | аргон | гелий |
| МИГ | СвАМг5 | 300...320 | 24...25 | 350...360 | 38 | 20 | 20 |
| | СвАК5 | 300...320 | 24...25 | 350...360 | 38 | 20 | 20 |
| ТИГ | СвАМг5 | 430...440 | 10...11 | 85 | 8 | 20 | — |
| | СвАК5 | 430...440 | 10...11 | 85 | 8 | 20 | — |

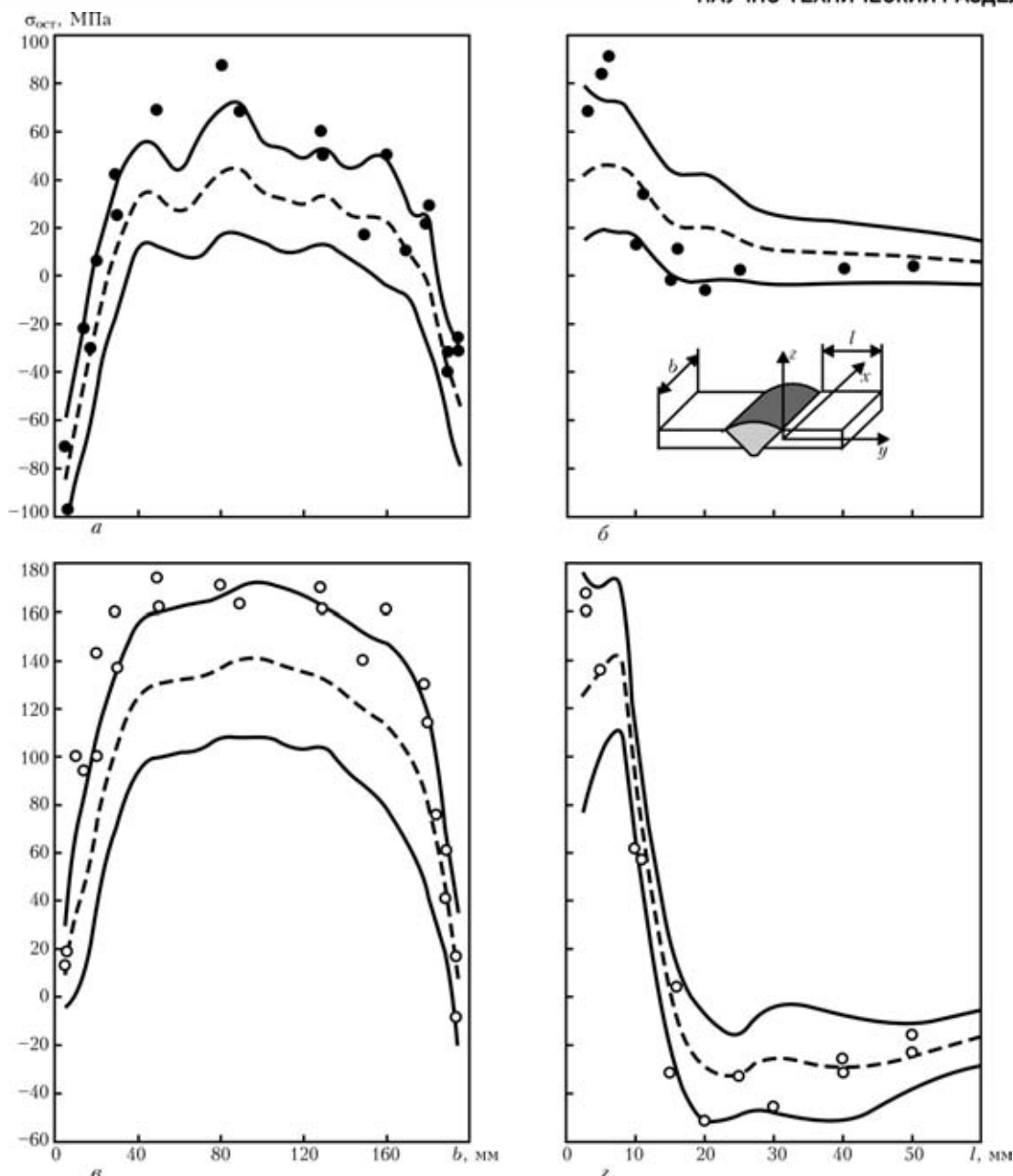


Рис. 2. Поперечные $\sigma_{ост}^y$ (а, б) и продольные $\sigma_{ост}^x$ (в, г) остаточные напряжения в образцах шириной 200 мм, полученных сваркой МИГ с применением проволок СВАМг5 (кривые) и СВАК5 (точки): а, в — сечение вдоль ЗТВ; б, г — сечение поперек шва вдоль оси образца; штриховые кривые — средние значения двенадцати измерений; сплошные — границы разброса измеренных данных

точника питания И-126 на сварочном автомате АС-ТВ-2М вольфрамовым электродом диаметром 6 мм. Режимы сварки приведены в табл. 1.

Для определения остаточных продольных $\sigma_{ост}^x$ и поперечных $\sigma_{ост}^y$ напряжений в образцах средней толщины использован неразрушающий акустический метод измерений, основанный на изменении скорости распространения ультразвука в металле в зависимости от его нагруженного состояния [14, 21]. Измерения осуществляли с помощью портативного прибора, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона. Погрешность измеряемого уровня напряжений не превышала 10 % предела текучести основного металла. База измерения продольных и поперечных остаточных напряжений определялась размерами датчика (7×7 мм) — акустического преобразова-

теля квадратной формы. Измеряли значения остаточных напряжений в сечениях, параллельных оси шва, проходящих по ЗТВ, и перпендикулярно шву в центральной части образца. Чтобы максимально приблизить датчик к зоне сплавления, его закрепляли на поверхности образца со стороны корня шва. В одном сечении образца в зависимости от его ширины и ожидаемого градиента напряжений измерения выполняли в 7...15 точках. Остаточные напряжения измеряли в сварных заготовках и исходных образцах до испытаний; их результаты представлены в обобщенном виде на рис. 2–5. Для определения остаточных напряжений в непосредственной близости к зоне сплавления (на расстоянии 2 мм от границы шва) применяли также тензометрический метод измерения датчиками с базой 5 мм. Остаточные напряжения

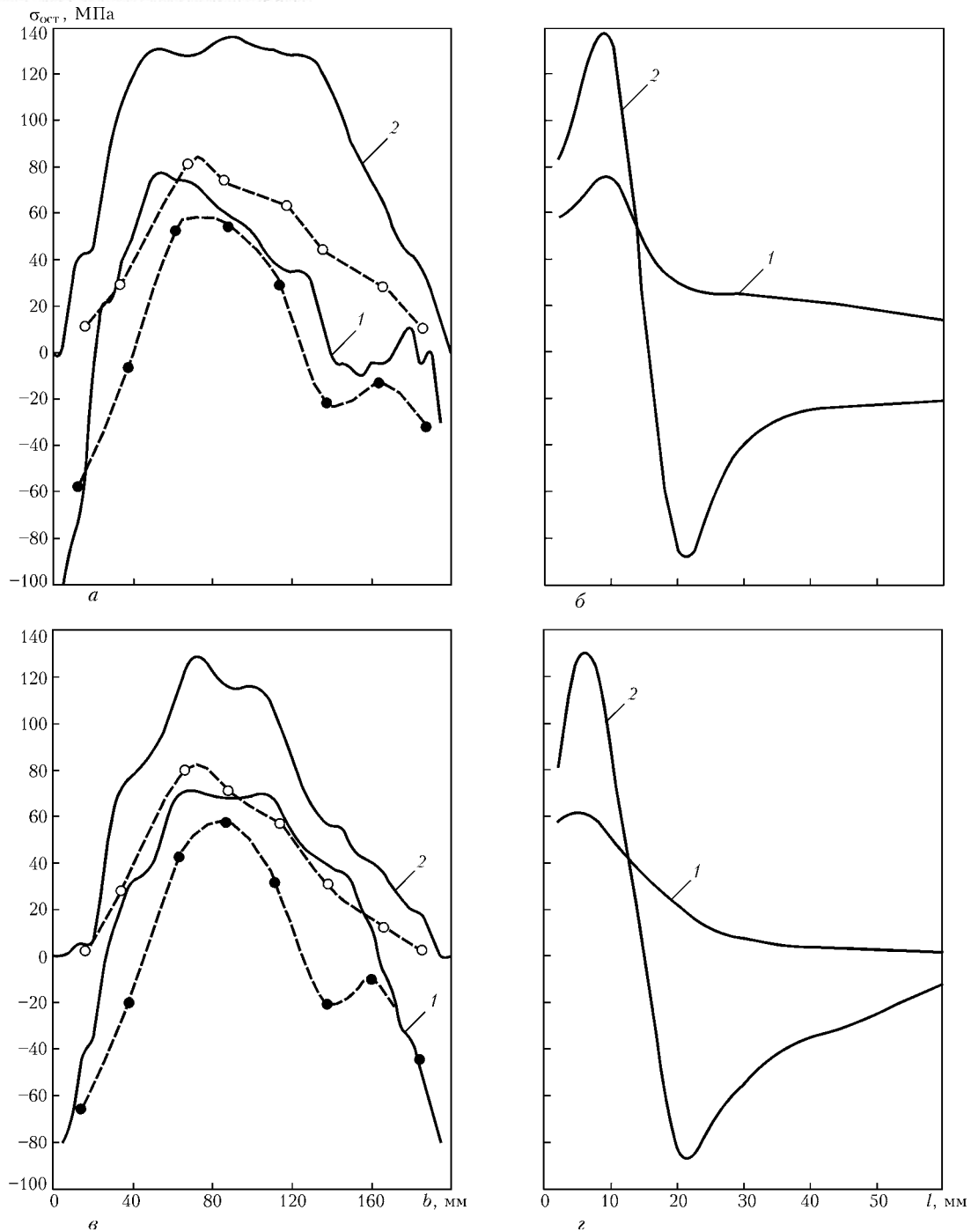


Рис. 3. Поперечные (1, ●) и продольные (2, ○) остаточные напряжения в образцах шириной 200 мм, полученных сваркой ТИГ с применением проволок SvAMg5 (а, б) и SvAK5 (в, г): а, в — сечение вдоль ЗТВ; б, г — сечение поперек шва вдоль оси образца; 1, 2 — средние значения трех измерений акустическим методом; штриховые кривые и точки — данные тензометрических измерений

в направлении толщины металла (рис. 2) не рассматривали, поскольку на поверхности $\sigma_{ост}^z = 0$.

Коэффициент концентрации напряжений в соединениях, обусловленной геометрией профиля шва, рассчитывали по известным зависимостям с учетом рекомендаций, представленных в работе [22]. Для этого использовали статистические данные измерений основных параметров профиля шва — радиуса ρ и угла θ галтельной поверхности на границе шва; высоты h и ширины b шва. Измерения этих параметров выполняли в заготовках и образцах, полученных различными способами и на различных режимах сварки: способом прямого

измерения (профилометрированием с ценой деления измеряющих устройств 0,01 мм) и способом репликации с помощью слепков из пластмассы и измерения инструментальным микроскопом при 10-кратном увеличении профиля рассеченного слепка. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Усталостные испытания однотипных сварных образцов стыковых соединений проводили на осевое циклическое нагружение при знакопостоянном коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = 0,1$ с частотой нагружения 4...7 Гц. Каждая серия испытаний включала не менее восьми однотипных образцов. Учитывая большой диапазон их ширины



Таблица 2. Параметры вышуклости шва и расчетный коэффициент α_σ концентрации напряжений в образцах

| Способ сварки | Тип сварочной проволоки | Страна шва | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | лицевая | | | | | корневая | | | | |
| | | ρ , мм | θ , град | b , мм | h , мм | α_σ | ρ , мм | θ , град | b , мм | h , мм | α_σ |
| ТИГ | СвАМГ5 | $\frac{1,13}{0,22}$ | $\frac{17,6}{2,2}$ | $\frac{16,9}{2,60}$ | $\frac{1,67}{0,18}$ | $\frac{1,50}{0,06}$ | $\frac{0,76}{0,30}$ | $\frac{35,0}{7,4}$ | $\frac{7,90}{0,36}$ | $\frac{1,38}{0,16}$ | $\frac{1,76}{0,16}$ |
| | СвАК5 | $\frac{1,32}{0,91}$ | $\frac{26,0}{6,4}$ | $\frac{21,20}{6,45}$ | $\frac{1,39}{0,19}$ | $\frac{1,72}{0,39}$ | $\frac{0,72}{0,24}$ | $\frac{36,9}{5,5}$ | $\frac{7,80}{0,52}$ | $\frac{1,38}{0,13}$ | $\frac{1,79}{0,14}$ |
| МИГ | СвАМГ5 | $\frac{1,10}{0,32}$ | $\frac{18,9}{3,2}$ | $\frac{17,40}{0,46}$ | $\frac{1,73}{0,27}$ | $\frac{1,55}{0,09}$ | $\frac{0,38}{0,21}$ | $\frac{51,3}{9,7}$ | $\frac{4,70}{0,65}$ | $\frac{1,77}{0,31}$ | $\frac{2,43}{0,67}$ |
| | СвАК5 | $\frac{0,73}{0,65}$ | $\frac{24,4}{6,9}$ | $\frac{17,10}{0,88}$ | $\frac{1,48}{0,25}$ | $\frac{1,91}{0,34}$ | $\frac{0,66}{0,53}$ | $\frac{46,7}{7,3}$ | $\frac{4,95}{1,90}$ | $\frac{1,66}{0,31}$ | $\frac{2,00}{0,40}$ |

Примечание. В числителе приведены средние значения; в знаменателе — стандартное отклонение.

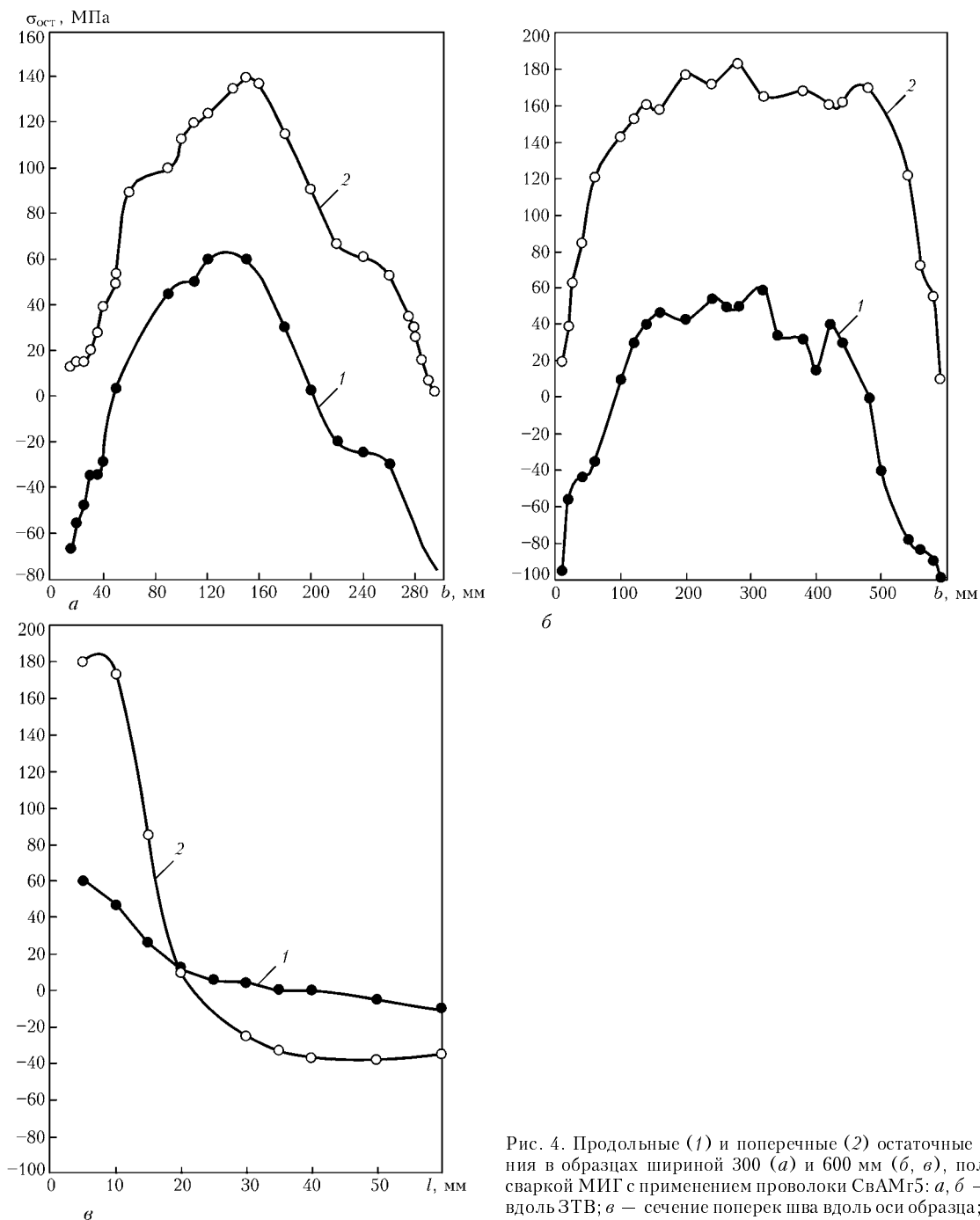


Рис. 4. Продольные (1) и поперечные (2) остаточные напряжения в образцах шириной 300 (а) и 600 мм (б, в), полученных сваркой МИГ с применением проволоки СвАМГ5: а, б — сечение вдоль ЗТВ; в — сечение поперек шва вдоль оси образца; точки — средние значения трех измерений

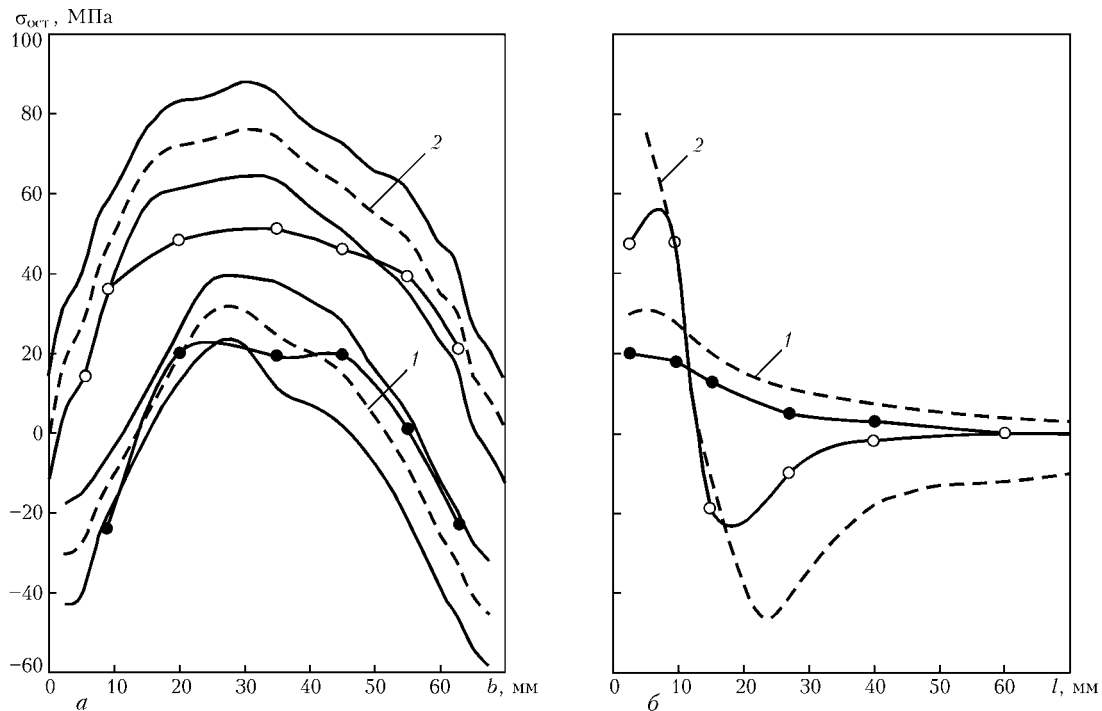


Рис. 5. Поперечные (1, ●) и продольные (2, ○) остаточные напряжения в образцах шириной 70 мм, полученных сваркой МИГ (кривые) и ТИГ (кривые с точками) с применением проволоки СвАМг5: а — сечение вдоль ЗТВ; б — сечение поперек шва вдоль оси образца; штриховые кривые — средние значения шести измерений; сплошные — границы разброса измеренных данных; точки — результаты единичных измерений

(70... 500 мм) для испытаний использованы электрогидравлические машины УРС-20 и Шенк-100 (РС-1,0), имеющие силоизмерительное устройство с погрешностью измерения нагрузки $\pm 1\%$. Для испытаний образцов значительной ширины применяли гидравлическую машину пульсаторного типа ЦДМ-200. Режим циклического нагружения этой машины устанавливали по напряжениям в образце с помощью тензометрических датчиков с базой 10 мм. Датчики приклеивали симметрично в четырех точках на поверхности рабочей зоны образца в 10 мм от границы шва. Для уменьшения неравномерного распределения от сосредоточенного приложения нагрузки в захватах испытательных машин применяли двухсторонние накладки, которые вырезали из основного металла в размеры захватной части образца. Их приваривали угловыми поперечными швами к торцам образца. Результаты усталостных испытаний представляли значениями размаха номинальных напряжений $2\sigma_a$ и долговечностью до полного разрушения сварного соединения.

Подготовили также серию сварных образцов шириной 200 мм с искусственно наведенными высокими поперечными растягивающими остаточными напряжениями в ЗТВ, расположенной в центральной части сварного соединения. Для наведения в ЗТВ поперечных растягивающих напряжений, сопоставимых по уровню с продольными растягивающими напряжениями, применен способ точечного нагрева, который осуществляли газовой горелкой до температуры около 250 °С на некотором удалении от шва при дополнительном отводе тепла из окрестности зоны нагрева с помощью медной кольцевой накладки, охлаждаемой проточ-

ной водой. Такая обработка не вызвала общей деформации образца, а поперечные растягивающие остаточные напряжения при этом возросли от 45 до 130 МПа.

Основные механические свойства на однократное статическое растяжение основного металла и сварных соединений, выполненных различными способами сварки, определяли на образцах стандартной ширины ($b = 15$ мм). Испытывали также на растяжение образцы большой ширины ($b = 70$ и 200 мм). Использованы универсальные машины УМЭ-10, УЭ-50 и Шенк-100 (РС-1,0). При оценке предела текучести для образцов шириной $b = 70$ и 200 мм использовали экстензометр с базой $L_{E_0} = 100$ мм, а для узких ($b = 15$ мм) — $L_{E_0} = 25$ мм. При оценке стандартного относительного удлинения δ_5 для широких образцов расчетная длина измерения ($L_0 = 5,65\sqrt{bt}$) значительно превышала ширину ЗТВ металла. Определяли также относительное удлинение $\delta_{50\text{ мм}}$ на базе $L_0 = 50$ мм, которое соответствовало максимальной ширине ЗТВ. Средние значения, полученные при испытании трех и более образцов, представлены в табл. 3.

Результаты исследований. Механические свойства сварного соединения. Испытания образцов сварного соединения на кратковременное растяжение показали следующее: предел прочности σ_B на 30 %, предел текучести $\sigma_{0,2}$ на 50 %, относительное удлинение δ_5 более чем в 2 раза, $\delta_{50\text{ мм}}$ на 21 % ниже соответствующих характеристик основного металла (см. табл. 3). Такое снижение механических свойств вызвано термическим разупрочнением основного металла вблизи границ шва. При этом сварные образцы разрушались на



Таблица 3. Механические свойства, полученные при растяжении образцов сварного соединения

| Способ сварки | Тип сварочной проволоки | Вид образца | b , мм | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\delta_{50\text{ мм}}$, % | δ_5 , % | |
|---------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|------|
| ТИГ | СвАМг5 | Без выпуклостей | 15 | 185 | 109* | 7,6 | 6,9 | |
| | | С выпуклостями | 70 | 199 | 137 | 9,2 | 4,0 | |
| | СвАК5 | Без выпуклостей | 15 | 186 | 117* | 8,0 | 7,3 | |
| | | С выпуклостями | 15 | 178 | 119* | 8,1 | 7,4 | |
| | | »» | 70 | 202 | 141 | 8,3 | 3,6 | |
| МИГ | СвАМг5 | Без выпуклостей | 15 | 203 | 102* | 8,5 | 7,7 | |
| | | »» | 70 | 219 | 137 | 10,7 | 4,65 | |
| | | С выпуклостями | 70 | 222 | 155 | 9,2 | 4,0 | |
| | | »» | 200 | 219 | 161 | 7,8 | 2,0 | |
| | СвАК5 | Без выпуклостей | 15 | 200 | 117* | 8,1 | 7,4 | |
| | | »» | 70 | 209 | 139 | 9,9 | 4,3 | |
| | | С выпуклостями | 70 | 212 | 144 | 8,3 | 3,6 | |
| | Без сварки | | Основной металл | 20 | 291 | 261* | — | 13,0 |

Примечание. Значения $\sigma_{0,2}$ со звездочкой определяли экстензометром с базой 25, остальные — с базой 100 мм.

расстоянии 6...8 мм от границы шва. Характер разрушения почти не зависит от применяемого способа сварки и типа сварочной проволоки. Основной металл образцов за пределами ЗТВ при испытаниях до разрушения практически не накапливал остаточных деформаций удлинения.

Увеличение ширины сварного образца от 70 до 200 мм приводит к возрастанию значения $\sigma_{0,2}$ на 5 % и снижению $\delta_{50\text{ мм}}$ на 15 %. Подобное влияние оказывает выпуклость шва (по сравнению с образцами без выпуклости) при ее срезании в узких и широких образцах. Способ сварки практически не влияет на σ_b , $\sigma_{0,2}$ и $\delta_{50\text{ мм}}$ сварных соединений. Однако в случае снятия выпуклости шва наблюдается заметное увеличение условного предела текучести образцов, сваренных проволокой СвАК5 вместо СвАМг5.

Увеличение условного предела текучести и снижение относительного удлинения в образцах большой ширины, возможно, связано с влиянием продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений в сварном соединении, которые направлены перпендикулярно напряжениям внешнего нагружения и способствовали увеличению жесткости напряженного состояния в ЗТВ.

Остаточные напряжения. В образцах большой ширины ($b = 200$ мм), полученных сваркой МИГ с применением проволоки СвАК5, остаточные напряжения имеют высокие значения в продольном направлении — $\sigma_{\text{ост}}^x = 140$ МПа и низкие в поперечном направлении — $\sigma_{\text{ост}}^y = 45$ МПа (см. рис. 2). Как видно из рисунка, при ширине, рекомендуемой [7] для сварных стальных образцов, поперечные растягивающие остаточные напряжения в 3 раза ниже, чем продольные. На рис. 2 представлены средние значения результатов определения остаточных напряжений акустическим методом в 12 однотипных образцах для сечений, проходящих вдоль ЗТВ на расстоянии 7,5 мм от границы шва, и поперек сварного шва вдоль оси образца. В продольных ко шву сечениях отсчет расстояния

от края образца по ширине совпадал с направлением сварки, а в поперечных ко шву сечениях он начинался от границы шва, отвечающей зоне сплавления. При неизменном режиме сварки МИГ и применении проволоки СвАК5 растягивающие поперечные ($\sigma_{\text{ост}}^y$) и продольные ($\sigma_{\text{ост}}^x$) остаточные напряжения в ЗТВ, расположенной в центральной части образца, заметно выше средних значений остаточных напряжений в образцах, полученных сваркой МИГ проволокой СвАМг5. При этом данные одиночных измерений остаточных напряжений в образцах, выполненных проволокой СвАК5, находятся на верхней границе, отвечающей одному стандартному отклонению результатов измерений остаточных напряжений в образцах, сваренных проволокой СвАМг5.

В продольном ко шву сечении (см. рис. 2, *в*) продольные растягивающие остаточные напряжения одного знака имеют максимальные значения в центре образца и нулевые по его краям. Подобный характер распределения поперечных растягивающих остаточных напряжений наблюдается в перпендикулярном ко шву сечении с максимальным их значением вблизи шва и снижением до нулевого значения при удалении от шва более чем на 60 мм (см. рис. 2, *б*). Поперечные растягивающие остаточные напряжения в продольном ко шву сечении (см. рис. 2, *а*) так же, как и продольные остаточные напряжения в поперечном ко шву сечении (см. рис. 2, *з*), уравновешены сжимающими напряжениями по краям образца (в продольном сечении) и примыкающим к ЗТВ основным металлом (в поперечном сечении). Однако характер распределения (эпюра) поперечных растягивающих остаточных напряжений в продольном ко шву сечении в отличие от классической эпюры в виде правильной параболы с экстремумом в центре образца имеет более сложный вид с несколькими экстремумами по всей ширине образца. Чередование максимума и минимума напряжения существенно сказывается на снижении максимального растягива-



ющего напряжения и увеличении разброса результатов измерений (см. рис. 2, а).

Более одного экстремума поперечных растягивающих напряжений наблюдается также и на образцах шириной 200 мм (см. рис. 3, а, в), полученных сваркой ТИГ присадочными проволоками СВАМг5 и СВАК5. Первый пик образуется в начале сварного шва на расстоянии 80 мм от края образца и имеет более высокое, чем при сварке МИГ, среднее растягивающее остаточное напряжение ($\sigma_{ост}^y = 80$ МПа). Второй пик низкого уровня наблюдается на расстоянии 160 мм от края образца.

При термическом цикле сварки ТИГ образцов шириной 200 мм образуется вдоль шва такая же зона с растягивающими остаточными напряжениями, как и в случае сварки МИГ; она составляет 15 мм с лицевой стороны шва. Однако более заметно проявляется спад максимальных продольных растягивающих напряжений $\sigma_{ост}^x$ особенно в непосредственной близости к границе шва (см. рис. 3, б, г). Применение тензометрического метода измерения остаточных напряжений на расстоянии 2 мм от границы шва показало, что продольные и поперечные остаточные напряжения и характер их распределения не зависят от типа применяемой присадочной проволоки, при этом значения максимальных поперечных остаточных напряжений близки к значениям, полученным акустическим методом. Как видно из рис. 3, а, в, продольные остаточные напряжения на расстоянии 2 мм от границы шва (измеренные тензометрическим методом) существенно ниже продольных остаточных напряжений на расстоянии 7,5 мм от границы шва.

При увеличении ширины образца, выполненного сваркой МИГ проволокой СВАМг5, до 300 мм остаточные напряжения остаются практически на том же уровне — $\sigma_{ост}^x = 140$ и $\sigma_{ост}^y = 60$ МПа (см. рис. 4, а). Дальнейшее увеличение ширины образца до 600 мм, выполненного сваркой МИГ проволокой СВАМг5, способствует возрастанию средних продольных остаточных напряжений до $\sigma_{ост}^x = 180$ МПа, при этом значения поперечных растягивающих остаточных напряжений остаются на том же уровне ($\sigma_{ост}^y = 50 \dots 60$ МПа) или становятся в 3 раза меньшими, чем максимальные продольные остаточные напряжения (см. рис. 4, б, в). С увеличением ширины образца ширина ЗТВ с продольными остаточными напряжениями возрастает до 18 мм.

В образцах шириной 70 мм, полученных сваркой МИГ проволокой СВАМг5, характер распределения поперечных остаточных напряжений в сечении ЗТВ зависит также от направления сварки (см. рис. 5). Первый максимум находится на расстоянии 20...25 мм от края образца в направлении сварки. Уровень среднего максимального поперечного растягивающего напряжения в ЗТВ по результатам шести измерений составляет $\sigma_{ост}^y = 30$ МПа. Результаты измерений поперечных остаточных напряжений в образцах, полученных сваркой ТИГ проволокой СВАМг5, не выходят за пределы стандартного отклонения остаточных

напряжений в образцах, выполненных сваркой МИГ. Однако продольные растягивающие остаточные напряжения в отдельных образцах заметно зависят от способа сварки. Средние максимальные растягивающие напряжения в образцах при сварке МИГ составляют $\sigma_{ост}^x = 75$ МПа, а при ТИГ — $\sigma_{ост}^x = 50$ МПа. При этом не зависимо от способа сварки зона с продольными растягивающими остаточными напряжениями распространяется на 13 мм от границы шва, а отношение продольных растягивающих остаточных напряжений к поперечным в ЗТВ центральной части образца составляет около 2,6.

Таким образом, в образцах одинаковой ширины сварка МИГ обеспечивает более высокие растягивающие продольные остаточные напряжения и более низкие растягивающие поперечные остаточные напряжения по сравнению с остаточными напряжениями $\sigma_{ост}^x$ и $\sigma_{ост}^y$, образующимися при сварке ТИГ в непосредственной близости к границе шва (см. рис. 2–5). При увеличении ширины образца с 70 до 600 мм продольные остаточные напряжения, формируемые при сварке МИГ, возрастают от 0,25 до 0,80 значения предела кратковременной прочности сварного соединения σ_B (см. табл. 3). При сварке ТИГ продольные остаточные напряжения в 1,8 раз ниже, чем $\sigma_{ост}^x$ в образцах такого же размера ($b = 200$ мм), полученных сваркой МИГ. С увеличением ширины образца практически пропорционально увеличивается и поперечная составляющая растягивающих остаточных напряжений с сохранением отношения $\sigma_{ост}^x / \sigma_{ост}^y = 2,8$ (при сварке МИГ) и 1,4 (при сварке ТИГ).

Итак, двухосное остаточное растяжение, вызванное сваркой, распространяется в центральной части образца в ЗТВ на ширине 13...18 мм от границы шва (в образцах шириной $b = 70 \dots 600$ мм) и на длине приблизительно 0,7 общей длины шва или ширины образца. При сварке МИГ стабильные максимальные значения растягивающих остаточных напряжений $\sigma_{ост}^x = 0,8\sigma_B$, а $\sigma_{ост}^y = 0,3\sigma_B$ достигаются при ширине образца $b = 300$ мм. Причем по показателю $\sigma_{ост}^x / \sigma_{ост}^y$ можно заключить, что более жесткое напряженное состояние имеет место у соединений, полученных сваркой МИГ. Поскольку $\sigma_{ост}^x$ направлены перпендикулярно оси образца, то при испытаниях на растяжение они не суммируются с напряжениями внешнего нагружения.

Характерной особенностью распределения поперечных остаточных напряжений в ЗТВ является образование нескольких экстремальных пиков вдоль шва. При сварке МИГ количество пиковых значений поперечных растягивающих остаточных напряжений больше, а их уровень в 2 раза ниже, чем при сварке ТИГ. В образцах наиболее распространенной ширины (70 мм), полученных сваркой МИГ, значения поперечных остаточных напряжений также низки, как и в образцах большой ширины. Поперечные растягивающие остаточные напряжения в центральной части образцов, начиная с ширины 200 мм, в отдельных случаях снижаются

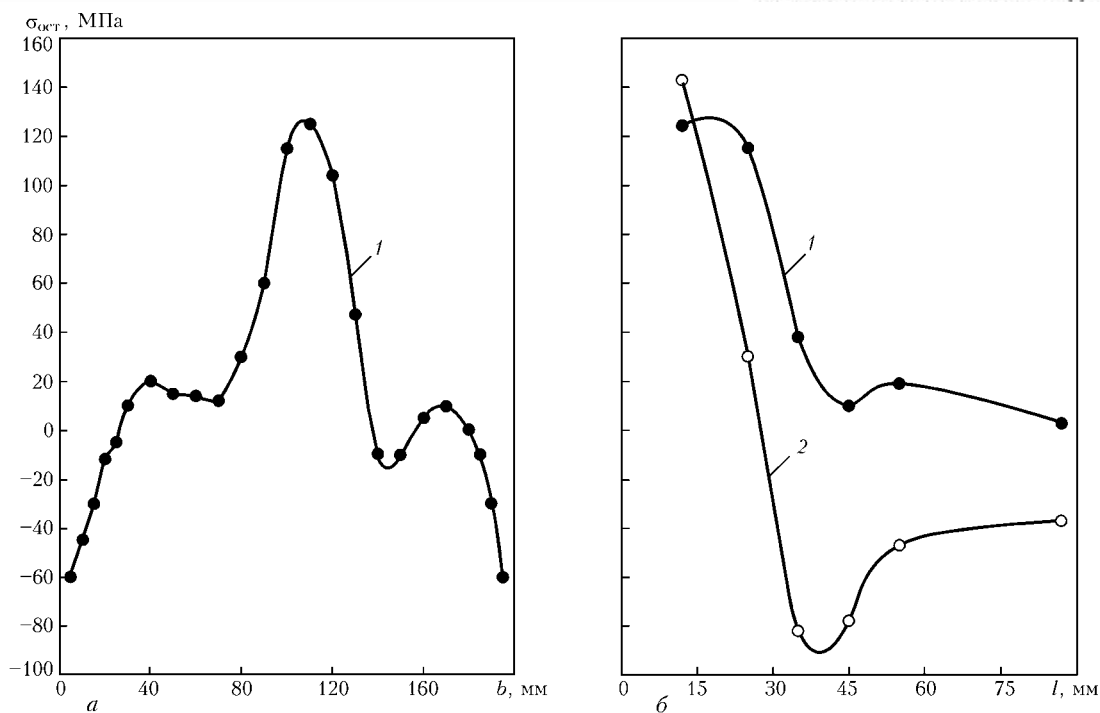


Рис. 6. Поперечные (1) и продольные (2) остаточные напряжения после точечного нагрева в центре сварного образца шириной 200 мм: а — сечение вдоль ЗТВ; б — сечение поперек шва вдоль оси образца (отсчет расстояния от центра нагрева)

до нулевого значения. При этом эпюра поперечных напряжений по ширине образца может приобретать «двугорбый вид» (см., например, рис. 3).

Использование точечного нагрева для дополнительного увеличения растягивающих остаточных напряжений в ЗТВ показало, что высокие поперечные растягивающие напряжения локализуются только вблизи зоны активного нагрева на расстоянии 35...40 мм от точки нагрева (рис. 6, б). При этом результирующие значения поперечных остаточных напряжений в сечении ЗТВ значительно возрастают только в узкой центральной зоне образца (рис. 6, а) до $\sigma_{ост}^y = 125$ МПа или $0,6\sigma_B$, что по уровню отвечает продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений в крупногабаритных сварных образцах.

Сопротивление усталости. Усталостные испытания образцов сварных соединений показали, что для рассматриваемых способов сварки ширина образцов и соответствующие им остаточные напряжения существенно не влияют на долговечность (рис. 7). Среднестатистическая кривая усталости образцов шириной 70 мм, полученных сваркой МИГ проволокой СвАМг5, и обобщенная для всех образцов шириной 70, 200 и 500 мм, выполненных сваркой МИГ проволокой СвАМг5, практически совпадают в пределах 95 % доверительных границ (рис. 7, а). При этом среднестатистическая кривая усталости для образцов шириной 70 и 200 мм, полученных сваркой ТИГ проволокой СвАМг5, смещена вверх и совпадает с верхней границей области разброса результатов испытаний всех образцов, выполненных сваркой МИГ этой же проволокой. Ширина образцов (70 и 200 мм) не вызывает заметных изменений сопротивления усталости также для соединений, полученных сваркой МИГ и ТИГ проволокой СвАК5 (рис. 7, б). Сред-

нестатистическая кривая усталости соединений, выполненных сваркой ТИГ, находится выше кривой усталости соединений, полученных сваркой МИГ. Очевидно, более низкие поперечные и более высокие продольные растягивающие остаточные напряжения при высокопроизводительном способе сварки МИГ не являются определяющими в повышении сопротивления усталости сварных соединений, по сравнению с более неблагоприятными остаточными напряжениями, образующимися при сварке ТИГ. Рост уровней продольных и поперечных остаточных напряжений, связанный с увеличением размеров образца, не приводит к заметному снижению долговечности соединений.

В представленных способах сварки более высокое сопротивление усталости соединений, выполненных сваркой ТИГ, чем соединений, выполненных сваркой МИГ, обусловлено более низкими средними значениями коэффициента концентрации напряжений α_σ (на 11...28 %) и в 3...4 раза меньшим разбросом значений α_σ , особенно со стороны корня шва (см. табл. 2). Из полученных результатов испытаний видно, что концентрация напряжений является основной причиной зарождения усталостной трещины практически по всей ширине образцов вдоль сварного соединения. Использование сварочных проволок различных типов не вызывает существенных отклонений коэффициента концентрации напряжений в корневой части шва. Однако усталостная трещина, зарождающаяся в зоне сплавления на границе корневой выпуклости, распространяется в глубь металла шва по его толщине, при этом она существенно влияет на сопротивление усталости образцов вследствие изменения состава и механических свойств металла шва. Долговечность соединений, полученных с использованием проволоки СвАК5, повышается в многоциклового

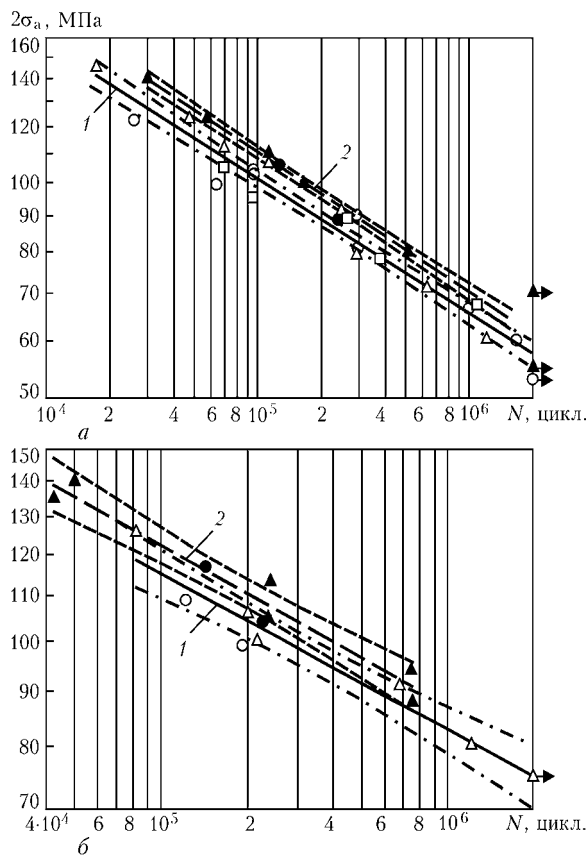


Рис. 7. Кривые усталости и их 95%-ные доверительные границы для соединений, полученных сваркой МИГ (1) и ТИГ (2) проволоками СвАМг5 (а) и СвАК5 (б): Δ , \blacktriangle — образцы шириной 70; \circ , \bullet — 200; \square — 500 мм; светлые точки — сварка МИГ, темные — ТИГ

области более чем в 4 раза по сравнению с долговечностью соединений, полученных сваркой ТИГ и МИГ с использованием проволоки СвАМг5 (рис. 8). Снятие выпуклостей без термического воздействия и изменения остаточных напряжений в металле шва приводит к существенному повышению долговечности и уровня предельного размаха напряжений соединений шириной 70 мм, выполненных сваркой МИГ проволоками СвАМг5 и СвАК5. Предельные размахи напряжений повышаются более чем на 50 %. Следовательно, сопротивление усталости соединений, полученных с применением рассматриваемых способов сварки, определяется прежде всего коэффициентом концентрации напряжений и механическими свойствами металла той зоны, где инициируется усталостное разрушение. Размеры образцов и естественная остаточная напряженность в них являются менее значимым фактором, чем геометрия швов, состав сварочной проволоки и применяемый способ сварки.

Искусственное наведение в центральной части образца шириной 200 мм у зоны концентратора дополнительных поперечных растягивающих остаточных напряжений до уровня, сопоставимого с продольными растягивающими остаточными напряжениями в соединении, вызывает снижение долговечности более чем в 2 раза, а предельного напряжения — на 10 МПа (14 %), по сравнению с соответствующими характеристиками образцов с естественной остаточной напряженностью (рис. 8).

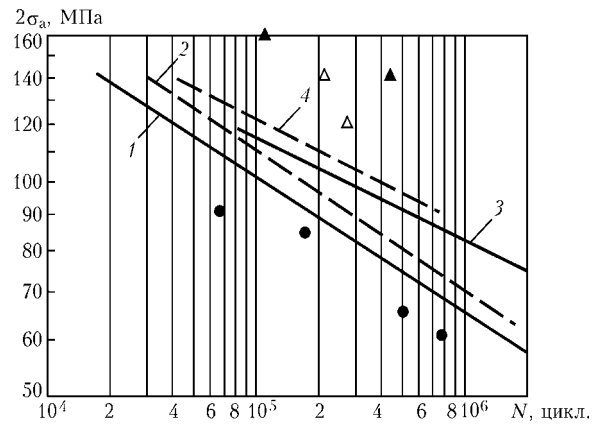


Рис. 8. Обобщенные среднестатистические кривые усталости образцов, выполненных сваркой МИГ (1, 3) и ТИГ (2, 4) проволоками СвАМг5 (1, 2) и СвАК5 (3, 4), и результаты испытаний образцов, выполненных сваркой МИГ и прошедших дополнительную обработку: \bullet — образцы шириной 200 мм с искусственно наведенными поперечными растягивающими остаточными напряжениями ($\sigma_{ост} = 125$ МПа), сварной шов выполнен проволокой СвАМг5; Δ , \blacktriangle — шириной 70 мм со снятыми выпуклостями, сварной шов выполнен соответственно проволоками СвАМг5 и СвАК5

Усталостные испытания крупногабаритных сварных образцов шириной до 500 мм позволили подтвердить тот факт, что поперечные и продольные растягивающие остаточные напряжения отличаются различным повреждающим эффектом. Увеличение продольных растягивающих остаточных напряжений в ЗТВ стыковых соединений с $\sigma_{ост}^x = 50...70$ (при $b = 70$ мм) до $\sigma_{ост}^x = 130...140$ МПа (при $b = 200$ мм) и даже до $\sigma_{ост}^x = 160...180$ МПа (при $b = 500$ мм) не вызывает существенных изменений долговечности, если ее значения в 3 раза меньше, чем поперечные растягивающие напряжения (в случае сварки МИГ). Эти напряжения в соединениях направлены перпендикулярно внешним растягивающим напряжениям. Вместе с напряжениями внешнего растяжения они создают двухосное растяжение в металле ЗТВ. Как известно [23], переход от одно- к двухосному растяжению является основным условием сдерживания пластического деформирования металла, что может являться причиной повышения предела текучести и снижения коэффициента концентрации напряжений.

Заметное (более чем в 2 раза) снижение долговечности при увеличенном значении поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений до $\sigma_{ост}^y = 125$ МПа в образцах сварных соединений, полученных с точечным нагревом по сравнению с исходными образцами ($\sigma_{ост}^y = 60...70$ МПа) при постоянном значении продольных остаточных напряжений обусловлено взаимодействием этих напряжений с напряжениями внешней нагрузки. Главным условием, обеспечивающим повышенную долговечность сварных соединений, является применение высоких скоростей сварки при минимальном тепловложении, а также выполнение сплошных непрерывных швов, что способствует существенному снижению поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений. В этом случае можно допускать высокие значения продольной



составляющей растягивающих остаточных напряжений, которая не только не вызывает повреждающего эффекта в условиях усталости сварных соединений, но и может компенсировать влияние поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений при условии $\sigma_{ост}^y \leq 1/3\sigma_{ост}^x$, а для проведения усталостных испытаний можно использовать принятые в практике сварные образцы небольших размеров.

Выводы

1. Установлено, что применение автоматизированных способов дуговой сварки стыковых соединений сплава АД33Т1 толщиной 6 мм на отдельных образцах шириной 70...600 мм с поперечным швом напроход способствует образованию в центральной части ЗТВ растягивающих остаточных напряжений с отношением уровня продольных напряжений к поперечным 3:1 (при сварке МИГ) и 1,4:1,0 (при сварке ТИГ). В случае сварки МИГ максимально стабильного уровня ($0,8\sigma_B$) продольные растягивающие остаточные напряжения достигают в ЗТВ при ширине образца более 300 мм. При одинаковой ширине образцов ($b = 200$ мм) поперечные растягивающие остаточные напряжения при сварке МИГ в 1,8 раза ниже, чем при сварке ТИГ.

2. При действии циклической нагрузки поперек сечения сварного шва роль продольных и поперечных по отношению к шву растягивающих остаточных напряжений при усталостном повреждении не тождественна. Увеличение продольных остаточных напряжений от 40 до 160 МПа за счет увеличения ширины образца при сварке МИГ практически не снижает долговечность соединения. Однако увеличение за счет дополнительных мер поперечных растягивающих остаточных напряжений от 40 до 125 МПа при неизменном уровне продольных остаточных напряжений снижает долговечность образцов более чем в 2 раза.

3. Не целесообразно применять крупногабаритные образцы для проведения усталостных испытаний соединений алюминиевых сплавов, свариваемых способом МИГ напроход, поскольку увеличение ширины образца более 70 мм не приводит к существенному увеличению поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений. При этом нет необходимости в применении дополнительных мер по повышению поперечных остаточных напряжений в образцах малой ширины, поскольку концентрация напряжений, обусловленная выпуклой формой шва, является главным повреждающим фактором при циклической нагрузке.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
2. Шонин В. А. Анализ результатов усталостных испытаний сварных соединений сплава АМГ6 // Автомат. сварка. — 1982. — № 3. — С. 71–73.

3. Sanders W. W., Day R. H. Fatigue behavior of aluminum alloy weldments // WRS Bulletin. — 1983. — № 266. — 21 p.
4. Dvoretckii V. I., Mikheev P. P., Shonin V. A. A procedure of fatigue analysis of aluminum structure welded joints. — S. 1., [1984]. — 16 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIV XIII-1138-84).
5. Келси Р. А., Нордмарк Г. Е. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Материалы советско-американского семинара, Киев, июнь 1981 г. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 119–126.
6. Шонин В. А. Сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов с учетом влияния остаточных напряжений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1984. — 16 с.
7. РД 50-551-85. Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений: Метод. указания. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 52 с.
8. Шонин В. А. Пределы ограниченной выносливости сварных соединений сплава АМГ6 // Автомат. сварка. — 1990. — № 4. — С. 12–18.
9. РД 50-694-90. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций: Метод. указания. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 84 с.
10. Казимиров А. А., Недосека А. Я. Об остаточных напряжениях и деформациях, возникающих при сварке сплава АМГ5В // Автомат. сварка. — 1962. — № 10. — С. 16–21.
11. Особенности распределения поверхностных остаточных напряжений в сварных плитах из сплава аниаль / С. Н. Киселев, В. А. Хаванов, Л. М. Скорняков, В. И. Гречинкин // Свароч. пр-во. — 1966. — № 12. — С. 6–8.
12. Tanaka E., Hirata K., Takeuchi K. Residual stress in butt-welded 5083 aluminum alloys. Studies on residual stresses in welded joints of aluminum alloys // Light Metals. — 1970. — № 1. — P. 7–15.
13. Недосека А. Я. Остаточные напряжения в пластинах при сварке стыкового шва // Автомат. сварка. — 1974. — № 11. — С. 32–38.
14. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца, В. К. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1974. — 106 с.
15. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. — М.; Л.: Машгиз, 1950. — 160 с.
16. Махиенко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
17. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, В. А. Шонин, М. П. Порицкий // Автомат. сварка. — 1976. — № 5. — С. 37–39.
18. Шонин В. А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление несущего элемента из сплава АМГ6 в месте приварки поперечных ребер // Там же. — 1978. — № 1. — С. 70–71.
19. Михеев П. П., Шонин В. А. Сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов с учетом остаточной напряженности // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Материалы советско-американского семинара, Киев, июнь 1981 г. — Киев: Наук. думка. — 1984. — С. 113–118.
20. Мэддокс С. Дж. Совершенствование правил расчета на усталость сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 97–104.
21. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. — Киев: Наук. думка, 1977. — 152 с.
22. Махиенко В. И., Мосенкис Р. Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–18.
23. Осаулenco Л. Л., Котенко Э. В. Двухосное растяжение и чувствительность материала к концентрации напряжений // Пробл. прочности. — 1981. — № 3. — С. 21–25.

The paper presents the results of evaluation of residual stresses in butt welded joints of aluminium alloy AD33 (6061) 6 mm thick on samples of different width (70...600 mm) produced by TIG and MIG welding processes. Experiments are used to demonstrate the influence of longitudinal and transverse tensile residual stresses on the strength and fatigue life of welded joints with a transverse weld under axial load.

Поступила в редакцию 21.05.2004



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

В. А. УЛЬШИН, д-р техн. наук, **М. Ю. ХАРЛАМОВ**, инж. (Восточноукраин. нац. ун-т им. В. Даля, г. Луганск)

Предложен метод определения оптимальных технологических параметров детонационно-газового напыления покрытий по критерию энергетических характеристик напыляемых частиц порошка, основанный на использовании генетического алгоритма. Показаны преимущества данного подхода по сравнению с другими методами решения задач оптимизации, с помощью компьютерного моделирования продемонстрирована его эффективность.

Ключевые слова: детонационно-газовое напыление, моделирование, оптимизация, скорость частиц, температура частиц, генетический алгоритм

На условия формирования покрытий значительное влияние оказывают скорость и температура напыляемых частиц. В свою очередь энергетические характеристики частиц при детонационно-газовом напылении покрытий (ДГНП) зависят от многих технологических параметров. Поэтому для получения покрытий с заданными свойствами необходимо нахождение оптимальных параметров. Поиск оптимизированных условий напыления осложняется из-за большого количества этих параметров, а также в связи с невозможностью выделить процесс, определяющий конечные результаты. На практике задача нахождения оптимальных параметров технологического процесса ДГНП решается путем проведения множества дорогостоящих экспериментов. Аналитические методики нахождения оптимизированных условий напыления не дают четких рекомендаций и заключаются либо в получении частного оптимума путем варьирования технологических факторов по одному из возможных параметров оптимизации [1], либо ориентировочного алгоритма построения технологического процесса (в зависимости от используемого материала частиц), что в итоге также сводится к варьированию одних технологических параметров при условии постоянства других [2]. В итоге при решении конкретной задачи получения покрытия с заданными свойствами указанные методы могут лишь дать оценочные значения технологических параметров и предполагают проведение натуральных экспериментов.

Целью настоящей работы являлось создание метода оптимизации технологических режимов ДГНП с учетом всех параметров, оказывающих влияние на энергетические характеристики напыляемых частиц, а тем самым и на формирование покрытия. К ним относятся [1, 3, 4]: химический состав порошка; состав используемой газовой смеси; грануляция порошка; навеска порошка; начальное расположение частиц в стволе детонационной установки (ДУ); геометрические параметры ствола ДУ; дистанция напыления.

Далее более подробно остановимся на выборе параметров и критериев оптимизации. При проведении расчетов геометрические параметры ствола ДУ и химический состав порошка считались заданными, а остальные параметры оптимизировались по ряду причин. Так, выбор состава напыляемого порошка в основном определяется условиями, в которых будет работать напыляемое изделие, что исключает данный параметр из числа варьируемых. Актуальной является задача разработки оптимальных по конструкции детонационных камер сгорания (стволов ДУ) для напыления покрытий. Однако ввиду многообразия возможных вариантов их конструктивного исполнения (использование ДУ с составными частями, изменяющими форму продольного и поперечного сечения ствола, применение различных насадок и пр.) пространство поиска оптимальных параметров значительно увеличивается и задача становится практически неразрешимой. Из теории газотермического напыления следует, что скорость и температура напыляемых частиц являются определяющими параметрами при формировании покрытия. При этом большую роль играет пространственно-временное распределение указанных величин в зоне формирования покрытия. В то же время данные о необходимом характере распределения параметров частиц во времени и пространстве для получения покрытий с заданными свойствами в литературе отсутствуют. Причиной этого является недостаточная изученность физико-химических процессов образования покрытия при газотермическом напылении, вследствие чего при решении конкретных задач применяются упрощенные математические модели, лишь косвенно отражающие структурные особенности напыляемых покрытий. Поэтому в ряде случаев можно говорить об усредненных значениях скорости и температуры частиц порошка при взаимодействии с напыляемой поверхностью. Данные характеристики использовались также и при оптимизации технологического процесса ДГНП в настоящей работе. В дальнейшем с развитием теории взаимодействия импульсной двухфазной струи и основы при ДГНП критерии оптимизации могут расширяться, что будет способствовать выбору оптимальных технологических



Рис. 1. Схема ствола ДУ и расчетной области (см. обозначения в тексте)

режимов напыления, обеспечивающих получение покрытий с заданной структурой и свойствами.

Отдельно следует рассмотреть такой оптимизируемый параметр, как грануляция порошка. В известных работах по детонационному напылению обычно рассматривается либо динамика поведения одиночных частиц в потоке продуктов детонации (ПД), либо течение монодисперсной газовзвеси. При выборе технологических режимов напыления использование последнего подхода предпочтительнее, поскольку позволяет учесть такой фактор, как влияние навески порошка на параметры двухфазного потока. В работах [1, 5 и др.] исследуется динамика поведения полидисперсных потоков, при этом используется ряд упрощений (рассматривается несколько ассамблей частиц с разными диаметрами, частицы в ассамблее имеют одну координату и скорость и др.), что не позволяет считать распределение частиц порошка по размерам непрерывным процессом. Повышение точности и достоверности результатов моделирования возможно при одновременном описании динамики поведения большого количества частиц. Это осуществлено в работе [6], в которой моделировали движения частиц порошка в плазменной струе для 3000 частиц. К недостаткам моделей, описывающих поведение полидисперсных порошков, следует отнести значительное увеличение времени решения задач. На современном уровне развития средств вычислительной техники это неприемлемо для решения задач оптимизации, требующих проведения расчетов большого количества возможных вариантов значений оптимизируемых параметров. В этих целях целесообразно использовать математические модели, описывающие поведение монодисперсного порошка при ДГНП, и при этом рассматривать средний диаметр частиц в напыляемой фракции.

Таким образом, перед исследователями поставлена задача выбора состава используемой газовой смеси, среднего диаметра порошковых частиц, навески порошка, начального расположения частиц в стволе ДУ, дистанции напыления при установленных геометрических параметрах ствола ДУ и состава порошка для придания напыляемым частицам заданных значений средней скорости и температуры при взаимодействии с напыляемой поверхностью.

В настоящей работе использовали модель из работы [7], позволяющую определять пространственно-временные параметры потока напыляемых частиц как внутри ствола ДУ, так и в пространстве

между срезом ствола и напыляемым изделием, в том числе и при использовании стволов ДУ переменного сечения. Моделирование производили при следующих условиях. Ствол ДУ длиной L , имеющий цилиндрическую форму с внутренним диаметром d , либо ствол с переменным сечением, имеющий выходной диаметр d , заполнен частично или полностью смесью газов при начальном их давлении p_0 , плотности ρ_0 и температуре T_0 . Внутри ствола в области (z_1, z_2) , причем $0 \leq z_1 < z_2 \leq L$, находится газовзвесь твердых сферических частиц. При инициировании у левого закрытого конца ствола формируется стационарная детонационная волна (ДВ), распространяющаяся вправо со скоростью детонации и D (рис. 1). При частичном заполнении ствола детонационной смесью оставшаяся часть ствола занимает не реагирующий газ. В этом случае после выхода ДВ на контактную границу газовой смеси – не реагирующий газ (ГС–НГ) происходит распад ДВ на ударную, движущуюся по НГ, и волну разрежения, движущуюся в обратном направлении по ПД. После достижения ударной или детонационной волной правого открытого конца ствола начинается истечение ПД и дисперсных частиц в окружающее газовое пространство.

Граничные условия ставились следующим образом. На оси симметрии, стенках ствола ДУ ставятся условия непротекания газа и дисперсных частиц. До тех пор, пока ДВ не достигла контактной границы ГС–НГ, ее параметры находятся по формулам для фронта стационарной ДВ (правое граничное условие). После достижения ДВ контактной границы на открытых границах расчетной области AB и BC ставятся условия свободного протекания фаз, на правой границе CE , согласно [8], ставится условие непротекания для газовой фазы и свободного проникновения для дисперсной фазы, т. е. достигший преграды порошок напыляется на нее.

Использовали следующие допущения: давление создается только газом; влиянием порошковых частиц пренебрегаем; вязкость и теплопроводность фаз учитывается лишь в процессах межфазного взаимодействия; расстояния, на которых параметры течения меняются, значительно много больше размеров частиц и расстояний между ними; частицы сферические монодисперсные и не вступают в химические реакции с ПД; дробление и столкновение частиц отсутствуют; ПД до начала истечения рассматриваются как реагирующая среда, имеющая в каждой точке равновесный химический



состав, после начала истечения — как инертный газ с постоянным показателем адиабаты; влияние частиц на характеристики ДВ не учитывается.

Система уравнений двухмерного осесимметричного нестационарного движения газозвеси имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_i v_i)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_i u_i)}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial (\rho_i v_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_i v_i^2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_i v_i u_i)}{\partial z} + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial r} &= (-1)^i f_r n, \\ \frac{\partial (\rho_i u_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_i v_i u_i)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_i u_i^2)}{\partial z} + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial r} &= (-1)^i f_z n, \\ \frac{\partial (\rho_2 e_2)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_2 e_2 v_2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_2 e_2 u_2)}{\partial z} &= q n, \\ \sum_{i=1}^2 \left[\frac{\partial (\rho_i E_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_i v_i E_i)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \alpha_i p v_i)}{\partial r} + \right. \\ &\left. + \frac{\partial (\rho_i u_i E_i)}{\partial z} + \frac{\partial (\alpha_i p u_i)}{\partial z} \right] = 0, \\ \rho_i &= \alpha_i \rho_i^0, \quad E_i = e_i + (v_i^2 + u_i^2)/2, \\ n &= 6\alpha_2 / (\pi \delta^3), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho_2^0 = \text{const}, \quad i = 1, 2, \end{aligned}$$

где v_i и u_i — составляющие скорости соответственно в радиальном r и осевом z направлении; e_i, E_i — удельные внутренняя и полная энергии i -й фазы; p — давление газа; f_z, f_r — составляющие силового взаимодействия со стороны газа на дисперсную частицу в цилиндрических координатах; q — интенсивность притока тепла к поверхности отдельной частицы; n — количество дисперсных частиц в единице объема смеси. Доля объема смеси, занятая i -й фазой, характеризуется ее объемным содержанием α_i . Каждой точке объема смеси ставятся в соответствие средняя плотность фаз ρ_i , характеризующая массу фазы в единице объема, и истинная плотность фаз ρ_i^0 , характеризующая плотность составляющих их веществ. Индексы $i = 1$ принадлежат газовой, а $i = 2$ — дисперсной фазам.

Использовались уравнения состояния идеального газа: $p = \rho_i^0 R T_1 / \mu_1$, $e_1 = e_1(T_1)$, где R — универсальная газовая постоянная; μ_1 — молекулярная масса ПД; T_1 — температура газовой фазы. До начала истечения для реагирующего потока газа в стволе ДУ применялось уравнение для полной внутренней энергии газа $e_1(T_1, \mu_1)$ и уравнение химического равновесия $\mu_1(\rho_1, T_1)$ [10, 11]. Уравнение для внутренней энергии дисперсной фазы, имеющее вид $e_2 = e_2(T_2)$, где T_2 — температура дисперсной фазы, записывалось с учетом возможного фазового перехода (плавления частиц).

Полученная система уравнений замыкалась путем задания законов межфазового силового и теплового взаимодействия газовой и дисперсной фаз f_z, f_r, q . Численное интегрирование выполнено методом «крупных частиц» [8]. Разностная схема конструировалась с учетом проведения вычислений для стволов ДУ переменного сечения.

Необходимые для проведения вычислений параметры ДВ (скорость детонации, температура,

давление, плотность, скорость газа в точке Чемпена–Жуге и др.) рассчитывали для смеси с условной формулой $C_a H_b O_c N_d$ с добавлением инертных газов на основе уравнений баланса вещества, химического равновесия, газодинамики и уравнения состояния с использованием модели [12].

Для решения задачи оптимизации выбран один из представителей класса методов эволюционных вычислений — генетический алгоритм (ГА) [13, 14], применение которого позволяет создавать эффективные алгоритмы для широкого класса задач оптимизации [15]. При этом не требуется дополнительная информация о характере исследуемой функции, ее свойствах (дифференцируемость, непрерывность и др.), не накладываются ограничения на область поиска, которая может быть невыпуклой или многосвязной. Особенности других методов решения задач глобальной оптимизации, среди которых основными являются переборный и локально-градиентный подходы, не позволяют их использовать при оптимизации технологических режимов ДГНП. Переборный алгоритм наиболее прост в реализации, но для поиска оптимального решения необходимо проводить вычисления для всех возможных вариантов значений переменных, что для многопараметрических многоэкстремальных задач является нереальным. Градиентные методы работают быстро, но не гарантируют оптимальность найденного решения. Они идеальны для решения задач, где целевая функция имеет один экстремум. ГА превосходит в скорости и точности определения решения также и методы случайного поиска (метод Монте-Карло и др.), поскольку в процессе вычислений позволяет накапливать удачные решения.

Основная идея ГА заключается в коллективном поиске оптимума множеством независимых наборов значений (векторов) переменных, являющихся потенциальными решениями. На начальном этапе векторы переменных генерируются случайным образом. В дальнейшем каждое новое множество наборов значений переменных по определенным правилам формируется на основе предыдущего с учетом целевой функции. При этом в процессе итераций среднее по множеству значение целевой функции приближается к экстремуму. В ГА, как правило, используется терминология, заимствованная из биологии. Так, одна комбинация набора значений переменных представляет собой особь, множество особей на каждой итерации алгоритма в свою очередь представляют собой популяцию. Приспособленностью особи является количественная характеристика, показывающая, насколько успешно особь решает поставленную задачу, т. е. приспособленность представляет собой значение целевой функции для данного варианта набора переменных. Рассмотрим работу ГА на примере оптимизации ТП ДГНП более подробно.

В ГА векторы переменных кодируются в хромосому, которая является цепочкой символов, записываемой с использованием двух, трех или четырех букв алфавита. В версии алгоритма для определения оптимальных технологических параметров ДГНП использовался вариант бинарного кодирования, который является наиболее естест-

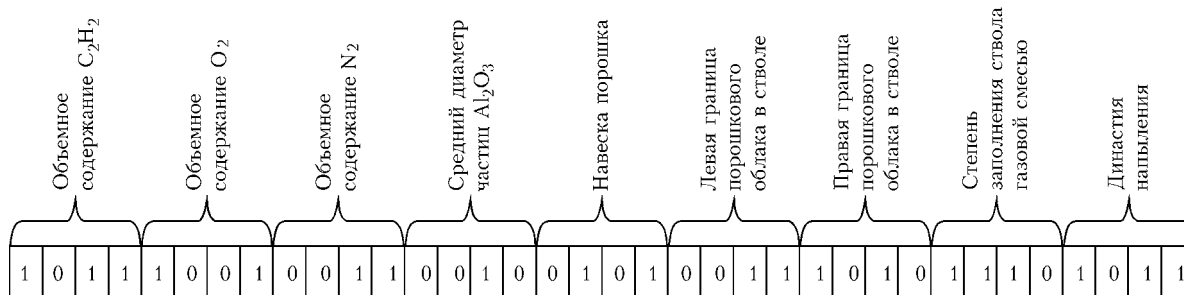


Рис. 2. Пример маски картирования хромосомы

венным при реализации алгоритма на ЭВМ, где вся информация представляет собой последовательность нулей и единиц. Кроме того, данная версия при тестировании алгоритма показала более быструю сходимость. Каждая переменная кодируется определенным фрагментом хромосомы, состоящим из фиксированного числа генов (разрядов). Рядом стоящие фрагменты никак не отделяются друг от друга, но при обратном декодировании хромосомы в вектор переменных на протяжении всего моделируемого периода используется одна и та же маска картирования. Размерность хромосомы определяется, исходя из количества параметров оптимизации и количества бит, необходимых для кодирования каждого параметра. При этом учитываются интервал возможных значений параметра $k_i[a_i, b_i]$ и точность его дискретного изменения ϵ_i . С учетом заданных условий количество бит t_i , необходимых для кодировки k_i , определяется из соотношения

$$t_i = \frac{\ln \left(\frac{b_i - a_i}{\epsilon_i} + 1 \right)}{\ln 2}.$$

На рис. 2 в качестве примера показано картирование хромосомы для наиболее часто применяемой в ДГНП газовой смеси ацетилена, кислорода и азота и порошка оксида алюминия.

В ГА прямая операция кодирования вектора переменных в хромосому не применяется. Хромосомы генерируются случайным образом, всякие последующие изменения в популяции затрагивают сначала генетический уровень, только после этого хромосомы декодируются и анализируются последствия этих изменений.

В процессе вычислений новая популяция получается путем воздействия на генотип родительских особей генетических операторов: кроссовера, мутации и инверсии, действие которых подробно описано в работе [14]. Оператор кроссовера для получения новой хромосомы производит обмен частями, на которые разбиваются две хромосомы-родители в любой точке. Оператор мутации произвольно изменяет состояние генов хромосомы на противоположное. Инверсия приводит к нарушению порядка следования генов в хромосоме потомка по сравнению с родительской хромосомой. Наиболее значим при поиске глобального экстремума оператор-кроссовер, поскольку он позволяет отбирать переменные, соответствующие наиболее удачному варианту решения для заданной целевой функции (неудачные варианты не будут включаться в новое поколение). Для глобального поиска

также предназначен оператор инверсии, тогда как мутация отождествляется со средствами локальной настройки решения.

В ГА предполагается, что количество особей от поколения к поколению остается неизменным. В этих условиях выбор родительских особей для получения новой популяции играет важную роль. Поэтому вероятность какой-либо особи текущей популяции стать родительской определяется пропорционально ее приспособленности.

При оптимизации процесса ДГНП приспособленность особей определялась следующим образом. На основе технологических параметров, полученных при декодировании хромосомы, моделируется движение двухфазного потока в стволе ДУ, его истечение в окружающую газовую среду и вычисляются средние значения скорости U_i и температуры T_i частиц на подложке. При наличии данных о средних значениях скорости и температуры частиц при взаимодействии с напыляемой поверхностью, особь удобно отображать в виде точки на пространстве критериев с осями U и T (рис. 3). Тогда приспособленность $\mu_i(t)$ особи A_i можно определить как расстояние, отделяющее параметры данной особи от оптимальных для получения заданного покрытия, а оптимальные значения соответственно скорости $U_{\text{опт}}$ и температуры $T_{\text{опт}}$ можно вычислить по формуле:

$$\mu_i(t) = \sqrt{(T_{\text{опт}} - T_i)^2 + (U_{\text{опт}} - U_i)^2} \rightarrow \min,$$

где t — номер поколения.

После определения приспособленности всех особей популяции вычисляется средняя приспособленность

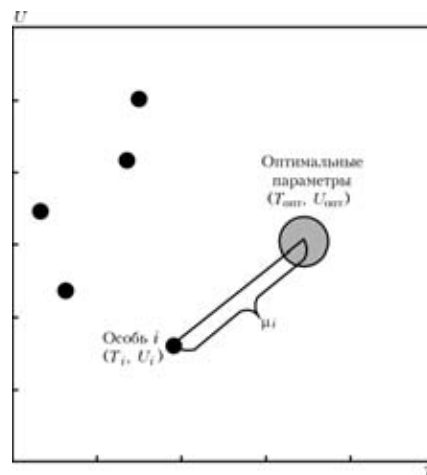


Рис. 3. Пространство критериев для задачи нахождения оптимальных технологических параметров ДГНП

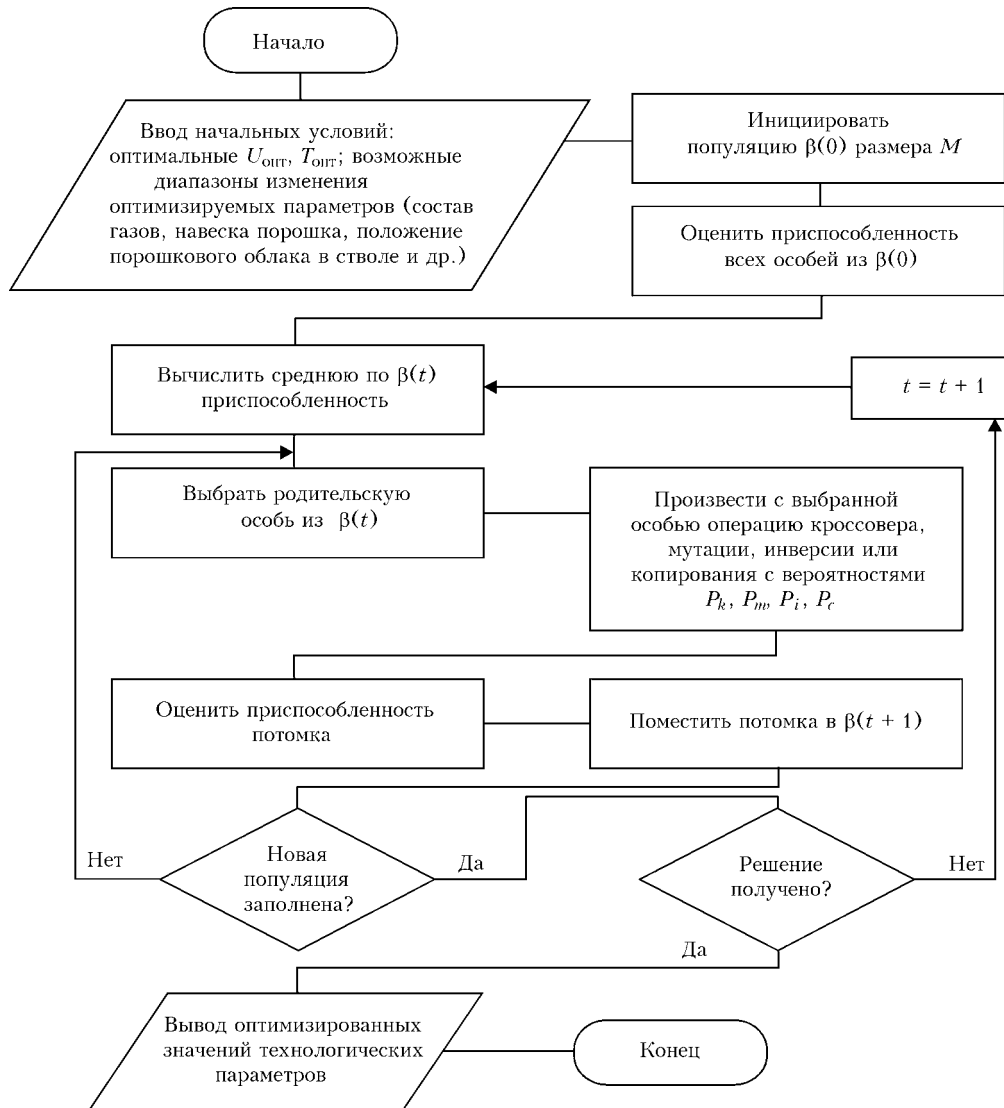


Рис. 4. Блок-схема работы генетического алгоритма

ленность по популяции $\hat{\mu}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(t) / M$, где M —

количество особей в популяции. Среди особей, у которых отношение $\mu_i(t) / \hat{\mu}(t) < 1$, выбираются родительские особи с вероятностями, пропорциональными их приспособленности.

Алгоритм поиска оптимальных технологических параметров ДГНП представлен на рис. 4. Генетические операторы — кроссовер, инверсия, мутация и процедура копирования (при этом особь помещалась в следующее поколение без изменения) выбирали на каждом этапе случайным образом с вероятностями соответственно 0,75; 0,05; 0,15; 0,05. Работу ГА тестировали при поиске минимума функции Розенброка.

Для иллюстрации применения описанного алгоритма ниже представлены результаты численного эксперимента по определению оптимальных технологических параметров ДГНП для порошка оксида алюминия и газовой смеси ацетилена, кислорода и азота. Начальные условия следующие: ствол ДУ длиной 1,6 м и диаметром 0,024 м; объемная доля C_2H_2 выбиралась равной 1; объемная

доля O_2 — 1,0...2,5; объемная доля N_2 — 0...1; возможный диаметр частиц — 20...90 мкм; навеска порошка — 0,05...1,00 г; возможное положение левой границы порошкового облака — 0,8...1,2 м, правой — 1,1...1,6 м от закрытого конца ствола ДУ; дистанция напыления — 0,10...0,25 м. В качестве оптимальных параметров частиц выбраны скорость $U = 850$ м/с и температура $T = 2500$ К. Популяция состояла из 30 особей. Процесс поиска оптимальных технологических параметров показан на рис. 5.

Как видно из рис. 5, ГА довольно быстро сходится, и к 25-му поколению все особи группируются вокруг экстремума. При этом получены следующие параметры: газовая смесь $C_2H_2 + 1,7O_2 + 0,88 N_2$; диаметр частиц — 20 мкм; навеска порошка — 0,05 г; левая граница порошкового облака — 0,8 м от закрытого конца ствола ДУ, правая — 1,28 м; дистанция напыления — 0,1 м. Время расчета на ПК с процессором Pentium 4 составляло приблизительно 1 ч.

Таким образом, разработанное на основе генетического алгоритма программное обеспечение существенно упрощает проведение машинных экспе-

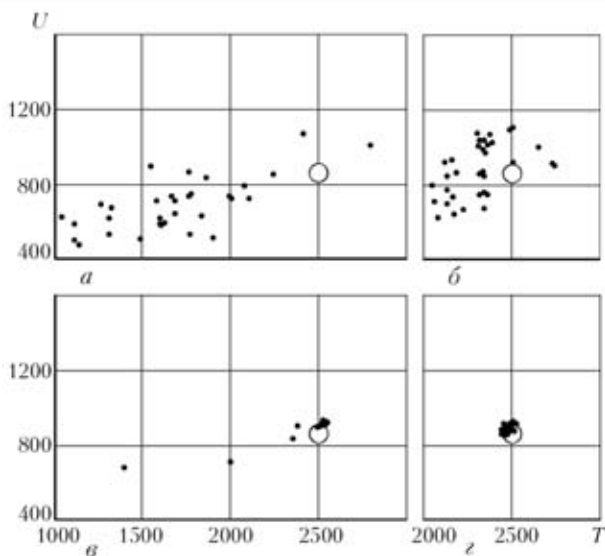


Рис. 5. Поиск оптимальных технологических параметров процесса ДГНП покрытий для частиц оксида алюминия: *a* — номер поколения $t = 0$; *b* — 4; \bigcirc — 16; \bullet — 25

риментов по оптимизации технологических параметров ДГНП и уменьшает затраты времени. Это достигается полной автоматизацией процесса поиска оптимального решения, действия оператора сводятся только лишь к вводу начальных условий. В дальнейшем данная программа будет интегрирована в систему поддержки принятия решений по проектированию технологических процессов ДГНП.

1. *Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И.* Детонационные покрытия в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1982. — 215 с.
2. *Детонационное* нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнитноабразивной обработкой / В. А. Богуслаев, А. И.

- Долматов, П. Д. Жеманюк и др. — Запорожье: Дека, 1996. — 364 с.
3. *Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А.* Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
4. *Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — 232 с.
5. *Карамышева С. А., Прохоров Е. С.* Влияние формы и степени заполнения ствола взрывчатой смесью на параметры разгона частиц в установках детонационного напыления // Вопросы использования детонации в технологических процессах: Сб. науч. тр. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. — С. 105–118.
6. *Lugscheider E., Papenfub-Janzen N.* Simulation of the influence of spray parameters on particle properties in APS // Proc. of the 2002 Intern. thermal spray conf. — Essen, 2002. — P. 42–46.
7. *Харламов М. Ю.* Динамика ускорения и нагрева порошка детонационно-газовой струей // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. праць. В 2 ч. Ч. 1. — Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2003. — С. 93–99.
8. *Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.: Наука, 1982. — 392 с.
9. *Нигматулин Р. И.* Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978. — 336 с.
10. *Ждан С. А., Феденюк В. И.* Параметры равновесного газового потока в стволе детонационной установки // Физика горения и взрыва. — 1982. — № 6. — С. 103–107.
11. *Николаев Ю. А.* Модель кинетики химических реакций при высоких температурах // Там же. — 1978. — № 4. — С. 73–76.
12. *Харламов М. Ю.* Вычисление состава продуктов и параметров детонации газовых смесей при напылении покрытий // Вісн. СХУ ім. В. Даля. — 2002. — № 11. — С. 254–262.
13. *Кружлов В. В., Борисов В. В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. — М.: Горячая линия–Телеком, 2002. — 382 с.
14. *Генетические* алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. — Харьков: Основа, 1997. — 112 с.
15. *Батищев Д. И., Исаев С. А.* Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов // Высокие технологии в технике, медицине и образовании: Межвуз. сб. науч. тр. — Воронеж: ВГТУ, 1997. — С. 4–17.

A method is proposed to determine the optimum process parameters of detonation-gas spraying of coatings by the criterion of energy characteristics of the sprayed powder particles, which is based on the use of a genetic algorithm. Advantages of this approach are demonstrated compared to other methods of solving the optimization problems, and computer modeling is used to demonstrate its effectiveness.

Поступила в редакцию 26.04.2004,
в окончательном варианте 17.09.2004

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПОЛИМЕРОВ

(аттестат аккредитации в системе УкрСЕПРО № ИА 6.001.Т271 от 13.12.2001)

- испытания на прочность (в том числе термомеханические) полимерных и композитных материалов, а также их сварных соединений;
- морфологические исследования полимерных материалов и изделий из них;
- определение теплофизических характеристик полимерных материалов и изделий из них;
- проведение сертификационных испытаний в соответствии с требованиями аккредитации в системе УкрСЕПРО.

Оснащение: электронный микроскоп JEM-100 CX (фирма JEOL, Япония); световой поляризационный микроскоп «Versamet-2»; стенд для гидравлических испытаний ИТР; разрывные машины; маятниковые копры; приборы для определения теплофизических характеристик.

ИЭС им. Е. О. Патона, отд. № 80
Тел./факс: (38044) 227 46 88
E-mail: korab@paton.kiev.ua



СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ (ОБЗОР)

В. Е. БЛАЩУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Г. М. ШЕЛЕНКОВ, канд. техн. наук (ОАО «Сум. машиностроит. НПО им. М. В. Фрунзе», г. Сумы)

Сделан обзор практического применения различных способов сварки плавлением титана и его сплавов. Приведены рекомендации по применению этих способов сварки и отмечены их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: лучевые способы сварки, сварка плавящимся и неплавящимся электродом в защитных газах и вакууме, сварка плавящимся электродом под флюсом, электрошлаковая сварка, плазменно-дуговая и микроплазменная сварка, титан, титановые сплавы, технологические возможности, толщина свариваемого металла

Титан и его сплавы отличаются особыми физико-механическими свойствами — высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, морской воде и ряде высокоагрессивных сред, в которых многие традиционные материалы проявляют низкую или недостаточную стойкость [1].

Объем промышленного применения титана и его сплавов во многом зависит от технологических возможностей процесса его сварки. Существенные трудности при сварке титана возникают в первую очередь из-за его высокой химической активности при повышенных температурах. В результате взаимодействия с газами атмосферы сплавы титана теряют пластичность и приобретают склонность к замедленному разрушению. В швах образуются дефекты (например, поры), вследствие чего имеет место значительное снижение сопротивления усталости, приводящее к разрушению сварной конструкции. Сварка термически нестабильных сплавов затруднена в связи с особенностями структурных изменений и фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ) при термомеханическом цикле сварки, в результате которого возможно образование хрупких и нестабильных фаз. Однако путем выбора соответствующих способов сварки, применения оптимальных режимов сварки и последующей термической обработки в большинстве случаев удается получить работоспособные сварные соединения.

На сегодня для соединения титана и его сплавов нашли практическое применение большинство существующих способов сварки плавлением (за исключением ручной дуговой сварки штучными электродами) [1–7].

Цель настоящей работы — систематизация сведений о технологических возможностях способов сварки плавлением титана и его сплавов применительно к соединению металла различных толщин.

Основной трудностью, возникающей при сварке плавлением титана, является обеспечение надежной защиты от контактов с воздухом сварочной ванны,

корня шва, а также остывающих участков сварного соединения.

Защите подлежат участки сварного соединения, нагретые выше температуры, при которой начинается заметное взаимодействие титана с газами атмосферы. В отечественной литературе и инструктивных материалах ее считают равной 400 °C [2–4], а в стандартах Американского сварочного общества — равной 500 °F (250 °C) [7]. Для защиты используют вакуум и инертные газы аргон, гелий, а также их смеси. В связи с тем, что качество сварного соединения зависит от чистоты инертного газа, для защиты применяют аргон 1-го (объемная доля аргона не менее 99,987 %) и высшего сортов (ГОСТ 10157–79) и гелий высокой чистоты (ТУ 51-940–80). В западных странах применяют в соответствии с EN439:1994 аргон (EN439 class 11) и гелий (EN439 class 12), а также их смеси (EN439 class 13); выбор защитных газов осуществляют в соответствии с ANSI/AWS C5.6-94R [7].

В зависимости от размеров свариваемых изделий и требований к их качеству используются следующие варианты защиты зоны сварки инертным газом:

общая защита изделия в камере с контролируемой атмосферой. В этом случае удается обеспечить наиболее надежную защиту зоны сварки, а также остывающих участков шва, его корня и ЗТВ. Применение такого типа защиты целесообразно в серийном производстве и при изготовлении изделий сложной конструкции;

локальная защита сварного соединения с использованием местных микрокамер, которые находят применение главным образом при сварке кольцевых неповоротных и поворотных стыков, обратная сторона шва при этом защищена благодаря заполнению инертным газом полости изделия;

струйная защита зоны сварки и остывающих участков соединения, осуществляемая их непрерывным обдувом с помощью сопла с увеличенным по сравнению с другими металлами и сплавами диаметром отверстия и удлиненной насадкой. Обдув корня шва происходит с помощью дополнительного приспособления с подачей инертного газа снизу [2–9]. Таким образом, в этом случае защитный газ подается в три канала: в сопло и защитные приспособления — удлиненную насадку и формирующую защитную подкладку.

Сварка титановых сплавов в вакууме выполняется при давлении остаточных газов $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Находит также применение сварка в низком (около

1...10 Па) вакууме. По содержанию кислорода и азота такая среда намного чище, чем аргон 1-го сорта. При сварке в вакууме полностью исключается загрязнение металла сварного соединения вредными примесями (газами) и обеспечивается максимальное приближение пластичности и вязкости сварного соединения к аналогичным свойствам основного материала (ОМ) [3–5, 8].

Качество сварных соединений титана во многом определяется технологией подготовки кромок деталей под сварку, а также маркой сварочной титановой проволоки. Подготовка кромок под сварку выполняется только механическим способом. Шероховатость поверхности кромок должна быть не хуже $R_z = 40$ (ГОСТ 2789). Поверхность деталей, которые прилегают к кромкам с обеих сторон на расстояние не менее 20 мм, зачищаются шабером или электрокорундовым кругом, а также вращающейся металлической щеткой, мелкой наждачной шкуркой, кругами с накаткой из абразивного материала или вулканитовым кругом. При зачистке абразивными кругами не допускается перегрев металла, который вызывает образование на поверхности сварки соединения цветов побежалости. Непосредственно перед прихваткой и сваркой зачищенные поверхности сварного соединения и сварочную проволоку обезжиривают, затем удаляют влагу с помощью чистых бязевых салфеток, смоченных ацетоном и этиловым техническим спиртом.

Для сварки титана наиболее широкое применение нашли дуговые способы сварки, из которых наиболее распространенной является сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах (ТИГ). Этот способ сварки является наиболее универсальным, поскольку позволяет выполнять соединение в различных пространственных положениях, в стесненных условиях и не требует переналадки оборудования при изменении толщины свариваемого металла и типа соединения.

Сварка ТИГ титана выполняется на постоянном токе прямой полярности. Вольфрамовый электрод является катодом и от его стойкости, формы заточки, постоянства эмиссионной способности во многом зависят стабильность процесса сварки, качество формирования швов и глубина провара. В таблице приведены данные о соответствии вольфрамовых электродов ряду национальных и международных стандартов. Электроды из чистого (нелегированного) вольфрама для сварки титана не применяются, поскольку не отличаются достаточной стойкостью [3, 4, 7]. Диаметр неплавящегося электрода выбирают в зависимости от значений сварочного тока с учетом допустимой нагрузки по току.

Автоматическая, механизированная и ручная сварка могут выполняться непрерывно горящей и импульсной дугой. При сварке ТИГ поверхностной дугой без разделки кромок за один проход соединяются листы титановых сплавов толщиной $b \leq 5$ мм (максимальный сварочный ток $I_{св} \leq 500$ А). Стыковые соединения титана больших толщин выполняют многослойной сваркой с разделкой кромок или в щелевую разделку и с подачей присадочной проволоки. В качестве присадочных материалов для сварки титана и его сплавов при-

меняют титановые сварочные проволоки, состав которых зависит от типа соединяемых материалов и последующей термообработки сварных изделий [1–4, 7].

Для соединения листов титана толщиной 0,5...2,0 мм применяют импульсно-дуговую сварку ТИГ, выполняемую импульсами тока прямой полярности. Регулируя сварочный ток и скорость сварки, а также длительность импульса тока и паузы, можно изменять размеры шва. При этом способе сварки уровень деформации титановых конструкций уменьшается на 15...30 % по сравнению со сваркой непрерывной дугой, снижаются также уровень остаточных напряжений и склонность к образованию в швах пор, которые являются основным дефектом при сварке поверхностной дугой. При этом уменьшается протяженность ЗТВ и размеры кристаллитов в металле шва, что способствует улучшению механических свойств сварных соединений [3, 4].

С целью повышения проплавления способности дуги при сварке ТИГ разработан ряд усовершенствований этого способа. Для соединения титана и его сплавов нашли применение следующие разновидности способа сварки ТИГ: погруженной дугой без и с электромагнитным перемешиванием сварочной ванны, сквозным проплавлением, сварка по флюсу, с присадочной порошковой проволокой, в узкую (щелевую) разделку, двухдуговая и др. [2–12].

При сварке погруженной дугой конец вольфрамового электрода находится ниже поверхности свариваемого металла. Это приводит к значительному увеличению коэффициента эффективности использования тепловой мощности дуги и позволяет сваривать за один проход без разделки кромок листы металла толщиной $b \leq 15$ мм. В случае двухсторонней сварки с помощью этого способа можно сваривать листы титана толщиной $b \leq 36$ мм. При этом сварные швы с каждой стороны листа выполняются в два прохода без применения присадочной проволоки: первый проход — погруженной дугой для получения требуемой глубины проплавления; второй — поверхностной дугой для сглаживания шва и придания ему требуемых геометрических размеров.

Погружение дуги осуществляют вручную (при малой толщине свариваемых листов металла — $b \approx 8...10$ мм) или специальной принудительной автоматической системой регулирования напряжения на дуге. К недостаткам этого способа сварки относятся большая ширина шва и крупнокристаллическая структура его металла, а также невоз-

Соответствие стандартов на вольфрамовые электроды

| ISO 6848, EN26848 NF EN26848, JIS Z3233, AWS A5.12-98 | ANSI/AWS A5.12 | Типы вольфрамовых электродов | ГОСТ 23949-80 | Номинальное содержание активизирующей присадки |
|---|----------------|------------------------------|---------------|--|
| WC20 | EWCe-2 | R 07932 | — | 2 % CeO ₂ |
| WL10 | EWLa-1 | R 07941 | ЭВЛ | 1 % La ₂ O ₃ |
| WT20 | EWTh-2 | R 07912 | ЭВТ-12 | 2 % ThO ₂ |



Рис. 1. Макрошлиф стыкового сварного соединения толщиной 24 мм, выполненного сваркой погруженной дугой

возможность регулирования химического состава металла и высокая склонность к образованию пор (рис. 1) [2–4, 10].

При сварке погруженной дугой в аксиальном магнитном поле возбуждение контролируемых движений жидкого металла в ванне создает возможность рационального воздействия на термokonцентрационные процессы, определяющие процессы кристаллизации. При этом имеет место улучшение структуры металла шва и резкое снижение его пористости [2–3, 11].

Сварка двумя дугами, горящими на вольфрамовых электродах в аксиальном магнитном поле, позволяет в 1,5...2,0 раза повысить допустимую скорость процесса без образования в швах таких специфических дефектов, сопутствующих форсированным режимам, как удлиненные газовые полости. Электромагнитное перемешивание сварочной ванны приближает уровень механических свойств и электрохимические характеристики сварного соединения к аналогичным показателям ОМ, а также способствует снижению дефектности, в частности пористости швов [2–3, 11].

Для повышения значения коэффициента наплавки при многослойной односторонней сварке ТИГ в разделку листов титана толщиной $b \leq 50$ мм разработана сварка двумя вольфрамовыми электродами, расположенными в плоскости, перпендикулярной оси шва. При этом сварку листов металла $b = 50$ мм выполняют за 6...8 проходов с использованием присадочной проволоки диаметром $D_{пр} = 5...7$ мм. Этот способ нашел применение в тех случаях, когда состав металла шва отличается от ОМ, а также при выполнении наплавки. По-



Рис. 2. Макрошлиф стыкового сварного соединения толщиной 30 мм, выполненного двухдуговой сваркой с присадкой

лученные сварные соединения характеризуются высоким качеством (рис. 2). Указанный способ сварки и оборудование для него разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона [3–5, 12].

Сварка ТИГ сквозным проплавлением позволяет за один проход сваривать листы металла $b \leq 12$ мм; установочная длина дуги составляет 0,5...1,0 мм. Для получения проплавления типа «замочная скважина» режим сварки назначается так, чтобы под дугой в металле образовывалось отверстие, заполняемое по мере продвижения дуги жидким металлом. Для получения усиления шва при таком способе сварки требуется выполнение второго прохода с использованием присадочной проволоки. Сложность регулирования химического состава металла шва по всему его сечению ограничивает применение этого способа сварки [3, 4].

Эффективным способом воздействия на проплавляющую способность дуги, а также на формирование шва и структуру его металла является аргонодуговая сварка по флюсу (А-ТИГ), при которой в атмосферу дуги вводятся галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, приводящие к изменению характера проплавления металла и формированию швов за счет контрагирования дуги. Сварка А-ТИГ по флюсу, наносимому на поверхности свариваемых кромок, позволяет получить однопроходные швы без разделки кромок на листах титана толщиной $b \leq 6...7$ мм. При этом благодаря повышению концентрации тепловой энергии в анодном пятне значительно уменьшаются необходимые для сварки ток и погонная энергия. Флюс способствует не только увеличению глубины провара, но и изменению формы проплавления. Ширина обратного валика при сварке А-ТИГ с возрастанием сварочного тока увеличивается быстрее, чем ширина шва. Улучшаются условия формирования обратного валика и уменьшается вероятность прожогов при сварке на весу [3–5].

Низкая погонная энергия, малые ширина шва и ЗТВ позволяют применять сварку А-ТИГ не только для стыковых соединений, но и для угловых, тавровых, нахлесточных, электрозаклепочных и других соединений листов титана толщиной $b \leq 3$ мм, сварка которых без применения флюса затруднена или невозможна. Сварка нахлесточных и электрозаклепочных соединений может осуществляться как со сквозным, так и неполным проплавлением нижнего листа. Малый объем сварочной ванны позволяет использовать сварку А-ТИГ для выполнения швов в различных пространственных положениях на вертикальной плоскости на листах титана при $b \leq 6$ мм. В результате применения флюсов на 15...20 % снижается деформация конструкций, при этом пористость исключается. Этот способ сварки приобретает особое значение при соединении термически упрочняемых и высоколегированных сплавов. Однако при сварке А-ТИГ требуется более высокая точность сборки, чем при сварке ТИГ. Для указанного способа сварки титана разработаны специальные флюсы серии АНТ-А, а также ФАН-1 [3–5].

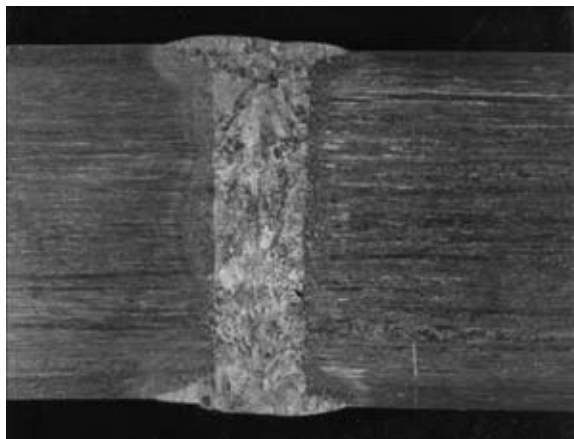


Рис. 3. Макрошлиф стыкового сварного соединения толщиной 24 мм, выполненного ручной сваркой в узкий зазор в аксиальном магнитном поле

С целью дозирования флюса при сварке листов титана толщиной $b > 4...5$ мм его вводят в дугу в виде наполнителя присадочной порошковой проволоки с оболочкой из титана. При этом сохраняется возможность однопроходной сварки листов титана толщиной $b \leq 16$ мм. После сварки А-ТИГ и с порошковой проволокой на поверхности шва остается слой затвердевшего шлака, который дополнительно защищает остывающий металл. Его следует удалять с помощью механической зачистки или химическим способом, что увеличивает трудоемкость сварочных работ.

Для соединения листов титана средней и большой толщины нашла применение сварка в узкий зазор. Этот способ сварки позволяет уменьшить примерно на 30 % объем наплавленного металла при повышении производительности процесса и снижении трудоемкости работ, связанных с подготовкой кромок под сварку. Для надежного сплавления металла шва со стенками разделки при ручной сварке вольфрамовым электродом используют горелку со специальным приспособлением, обеспечивающим сварку в реверсируемом аксиальном магнитном поле (рис. 3) [1–3, 11, 13].

Для сварки листов металла толщиной $b \leq 110$ мм предложен способ автоматической сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом дугой, управляемой магнитным полем. Указанный способ сварки позволяет снизить расход сварочных материалов, в 1,5... 2,0 раза повысить производительность процесса и уменьшить дефектность соединения титановых сплавов [3, 4, 13, 14]. Этот способ сварки обеспечивает получение металла швов с однородной структурой и высокие показатели механических и коррозионных свойств сварных соединений.

Для сварки поворотных и неповоротных стыков трубопроводов, а также сварки труб в трубные доски нашла применение сварка ТИГ поверхностной дугой. В этом случае применяется специализированное оборудование, не используемое при других способах сварки. Более подробно эти процессы рассмотрены в работах [2–4, 7, 15–17].

Для сварки неповоротных стыков титановых трубопроводов диаметром от 10 до 200 мм ($b = 0,5...2,0$ мм) в монтажных условиях в ИЭС им. Е. О. Патона разработана и изготовлена гамма

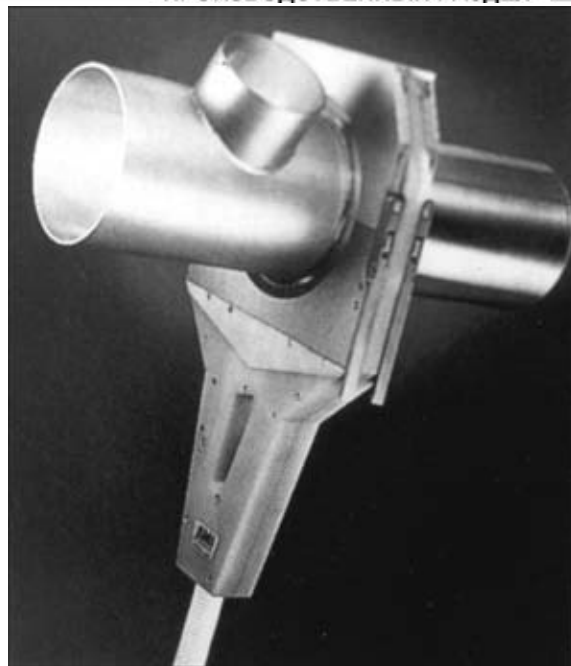


Рис. 4. Камера со встроенным электродвигателем привода вольфрамового электрода в монтажных условиях (производство компании «Arc Machines», США)

специализированного оборудования с накидными защитными микрокамерами, в которых благодаря продувке аргоном достигается необходимая чистота инертных газов. Такие камеры устанавливаются вокруг стана, вольфрамовый электрод перемещается с помощью электродвигателя, установленного как на расстоянии от камеры, так и в одном блоке с ней. Сварка может выполняться в непрерывном и импульсном режимах. На рис. 4 представлен общий вид современной сварочной микрокамеры, объединенной в один блок с электродвигателем.

Сварка ТИГ труб с трубными досками в теплообменниках из титановых сплавов выполняется в двух положениях — в нижнем и на вертикальной плоскости. Для сварки в нижнем положении в цеху оборудуется глубокая шахта для вертикального размещения теплообменника. При такой сварке трубная доска располагается в горизонтальной плоскости. При отсутствии шахт трубная доска размещается в вертикальной плоскости, а трубы в горизонтальной. В зависимости от размеров теплообменников и пространственного размещения швов находят применение и соответствующие способы сварки — ручная и автоматическая сварка ТИГ. Для этого используется специальное оборудование отечественного (ОАО СМНПО им. М. В. Фрунзе) и импортного (фирма ESAB, Швеция), «Astro Arc Polysonde», Франция и др.) производства [15–18].

Наряду со сваркой ТИГ для получения неразъемных соединений титана и его сплавов нашли применение способы сварки в инертных газах — плазменная (ПС) и микроплазменная (МПС), предназначенные для сварки листов титана толщиной $b \leq 1,5$ мм. При этом используют способы защиты такие же, как и при сварке неплавящимся электродом. Способ ПС является высокоскоростным и высокопроизводительным процессом и вы-



полняется «сжатой» дугой цилиндрической формы за счет ее обжатия стенками сопла. Оборудование для ПС подразделяется на следующие типы: для сварки листов титана ($b \leq 4$ мм) на небольшом и на большом токе, а также сварки плавящимся электродом дугой, горящей в потоке плазмы [1–4, 19–21].

При МПС титана в качестве источника нагрева используют сжатую дугу прямого действия, горящую между электродом и изделием. Стабильного горения и пространственной устойчивости микроплазмы на малых токах ($I_{св} \geq 0,1$ А) достигают благодаря высокой степени сжатия столба дуги, которая обеспечивается при использовании сопла с каналом малого (до 1 мм) диаметра и непрерывно горящей от отдельного источника питания дежурной дугой. МПС титана осуществляется на постоянном токе прямой полярности дугой, горящей в непрерывном или импульсном режимах. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, защитного газа — гелий или смесь $Ar + 50...75\%$ He. Средняя рабочая длина дуги при МПС почти на порядок больше, чем при сварке неплавящимся электродом в аргоне, и поэтому при данном способе сварки допускаются сравнительно большие отклонения длины дуги от заданного значения без особого влияния на параметры шва. В случае сварки изделий из титана при $b \leq 0,3$ мм соединения выполняют с отбортовкой кромок, а при $b = 0,1...0,2$ мм сборка деталей под сварку производится в прецизионных приспособлениях. Стыковые соединения можно выполнять на весу, а также на подкладной планке. В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны конструкции соответствующих плазмотронов, а также источники питания. Механические свойства соединений, выполненных МПС, практически равноценны ОМ. Применение указанного способа сварки исключает попадание вольфрама в шов.

При ПС достигается более глубокое проплавление, чем при сварке ТИГ. В связи с этим возможна ПС без разделки кромок изделия при $b > 10$ мм. В случае ПС толстолистового титана с проплавлением типа «замочная скважина» максимальная толщина свариваемых листов при односторонней сварке в основном определяется шириной обратного валика, который формируется под действием сил поверхностного натяжения. В переднюю часть сварочной ванны возможно введение присадочной проволоки, причем к ее диаметру и скорости предъявляются не такие жесткие требования, как при сварке ТИГ. В этом случае форма разделки кромок одно- или двухсторонняя V-образная. Благодаря использованию присадочной проволоки расширяется диапазон параметров сварки (зазор, смещение кромок, скорость сварки), а также есть возможность управлять химическим и структурным средствами металла шва, тем самым предупреждается возникновение трещин, подрезов, пор, а также создается возможность значительного увеличения объема наплавленного металла.

Для объединения достоинств применения вакуумной защиты и технологических приемов сварки

неплавящимся электродом создан источник тепла, пригодный для сварочных процессов — дуговой разряд между полым неплавящимся катодом (ДРПК) из вольфрама или титана и изделием в вакууме, по удельным энергетическим показателям уступающий лишь лучевым источникам энергии. В процессе сварки через полый катод подается с малым расходом аргон. Реализация указанного процесса в 3...5 раз дешевле, чем лучевых способов сварки, за счет низкой стоимости оборудования, а также менее жестких требований по подготовке соединений под сварку и технике безопасности (соответствует уровню безопасности при дуговой сварке в контролируемой атмосфере). Дуговая сварка в вакууме позволяет в режиме сквозного проплавления сваривать изделия из титана при $b = 8...12$ мм без разделки кромок за один проход на весу с плавным переходом к ОМ с лицевой и обратной стороны шва. Соединение листов титана толщиной $b = 12...20$ мм выполняют без разделки кромок двухсторонней сваркой с подачей присадочной проволоки малого диаметра. Последняя должна пройти через плазму ДРПК и коснуться хвостовой части сварочной ванны. Этот способ сварки применяют для получения замыкающего шва шар-баллонов из титана. Служебные свойства сварных соединений, выполненных ДРПК, находятся на уровне или даже выше аналогичных свойств соединений, выполненных сваркой ТИГ.

Сварка плавящимся электродом диаметром 1,6...5,0 мм в инертных газах (МИГ) нашла применение при выполнении стыковых, тавровых и нахлесточных соединений листов титана при $b \geq 3$ мм в нижнем положении. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности. При сварке МИГ сплавов титана можно получить оптимальные свойства сварных соединений путем выбора состава металла шва при изменении химического состава плавящегося электрода или регулирования в них доли ОМ. При автоматической сварке применяют проволоку диаметром 1,6...5,0 мм, при механизированной полуавтоматической — диаметром 1,6...2,0 мм [1–4].

При сварке МИГ титана размеры швов, а также качество их формирования зависят от подаваемого в горелку защитного газа. Швы при сварке в гелии получаются с более плавным переходом от усиления к ОМ, чем при сварке в аргоне, а проплавление ОМ при прочих равных условиях, более широкое, но менее глубокое. Применение гелия позволяет повысить тепловую мощность дуги и производительность процесса расплавления, что особенно важно при сварке листов титана средней и большой толщины. Однако при сварке МИГ в аргоне происходит меньше разбрызгивание расплавленного металла, чем при сварке в гелии. При этом расход аргона в 2...3 раза меньше, чем гелия. При сварке в аргоне снижается также напряжение на дуге. Поэтому при сварке титана рекомендуется использование смеси $0,8$ He + $0,2$ Ar, обеспечивающей хорошее формирование швов и стабильность процесса. Сварка стыковых соединений из листов сплавов титана средней и большой толщины производят с разделкой кромок, опти-

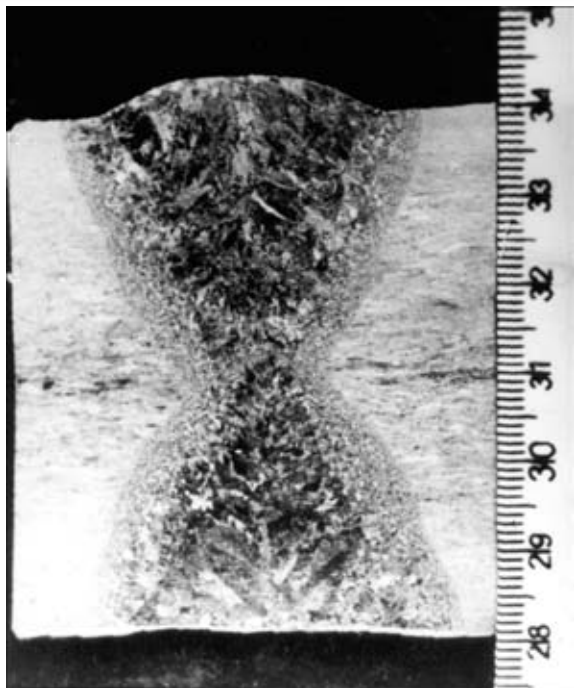


Рис. 5. Макрошлиф стыкового сварного соединения сплава ВТ1 толщиной 60 мм, выполненного двухсторонней сваркой МИГ в разделку

мальный угол раскрытия которых составляет 60° (рис. 5).

С целью увеличения коэффициента наплавки при стабильном горении дуги и возрастании скорости автоматической сварки МИГ предложен способ сварки плавящимся электродом, предварительно подогреваемым за счет омического сопротивления от отдельного низковольтного источника. При этом коэффициент наплавки увеличивается, а проплавляющая способность дуги уменьшается. Импульсно-дуговая сварка МИГ позволяет в монтажных условиях выполнять соединения в различных пространственных положениях, стабилизировать проплавление ОМ и практически полностью устранить разбрызгивание. Оно осуществляется за счет наложения мощных кратковременных импульсов тока на дугу постоянного тока и позволяет регулировать процесс формирования капли на конце электрода. Применение автоматической сварки МИГ обеспечивает высокие показатели пластичности, прочности и ударной вязкости металла швов.

Механизированная сварка МИГ в отличие от автоматической в основном применяется при выполнении тавровых соединений (например, вварка штуцеров) тонколистовых титановых конструкций. Это обусловлено повышенной массой горелки с защитными приспособлениями и трудностями обеспечения надежной защиты зоны сварки и остывающих участков шва. Для сварки в вакууме изделий из титана при $b = 2...50$ мм предложена сварка плавящимся электродом диаметром 1,6... 5,0 мм на постоянном токе обратной полярности. При таком способе сварки обеспечивается значительная пластичность металла шва благодаря высокой частоте его по содержанию вредных примесей (газов). Указанный способ разрабатывался для сварки в

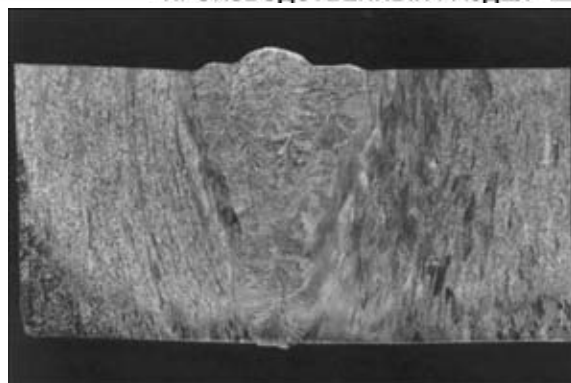


Рис. 6. Макрошлиф сварного соединения толщиной 60 мм, выполненного многопроходной сваркой плавящимся электродом под флюсом

космосе и проходил опробование в условиях невесомости [3].

Для автоматической сварки радиальных стыков сфер из листов титановых сплавов толщиной $b = 30...130$ мм разработана технология вертикальной сварки плавящимся электродом в аргоне в целевую разделку с горизонтальным расположением сварочной ванны и оборудование для ее реализации. При этом заполнение разделки осуществляли за один проход с колебательным перемещением сварочного мундштука по толщине изделия. Разработанные технология и оборудование обеспечивают высокое качество сварных швов, снижение трудоемкости сварки и расхода сварочной проволоки на 10... 15 % [22].

Для соединения листов титановых сплавов толщиной $b = 2,5...40,0$ мм в ИЭС им. Е. О. Патона создана технология сварки плавящимся электродом под бескислородными галоидными флюсами сухой грануляции серии АНТ. Сварку под флюсом стыковых, угловых и нахлесточных швов выполняют на постоянном токе обратной полярности. Сварку стыковых швов листового титана осуществляют на медной подкладке, на флюсовой подушке, а также на остающейся подкладке $b \leq 3$ мм. Листы металла при $b \leq 10...12$ мм сваривают однопроходными швами без разделки кромок, а при $b \geq 20...25$ мм — многопроходными швами. Для улучшения формирования швов сварку выполняют в разделку с углом раскрытия 90° и притуплением 3... 5 мм (рис. 6) [3, 4]. Техника автоматической сварки титана под флюсом практически не отличается от используемой для сварки сталей. Шов очищают от шлаковой корки после остывания всех его участков до $300...350^\circ\text{C}$. Металл швов, выполненных плавящимся электродом под флюсом, характеризуется удовлетворительными механическими свойствами, высокой плотностью и отсутствием пор.

Для сварки листов титана толщиной $b \geq 40$ мм в ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ электрошлаковой сварки (ЭШС). В связи с высоким электрическим сопротивлением титана при сварке этим способом используют электроды большого сечения ($D_{\text{пр}} \leq 5$ мм) — пластинчатые и проволочные, а также плавящиеся мундштуки. Для ЭШС применяют тугоплавкие бескислородные флюсы (типы АН-Т2), а поверхность шлаковой ванны защищают аргоном [3, 4, 23, 24].

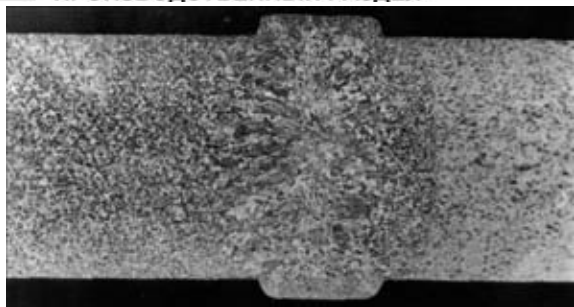


Рис. 7. Макрошлиф стыкового сварного соединения сплава ВТ1-0 толщиной 60 мм, выполненного ЭШС пластинчатым электродом

При сварке пластинчатым электродом ($b \leq 350$ мм) формирование швов осуществляется с помощью разъемных медных кокилей, охлаждаемых водой. ЭШС одной или двумя электродными проволоками используется для соединения листов титана при $b = 30 \dots 110$ мм. Для соединения крупногабаритных изделий из сплавов титана разработан процесс ЭШС плавящимся мундштуком и соответствующее оборудование. Выбор оптимальных параметров режимов сварки, обеспечивающих допустимую энергию процесса, позволяет получить швы с хорошим формированием (рис. 7).

При ЭШС α - и псевдо- α -сплавов, а также низколегированных ($\alpha + \beta$)-сплавов титана удается получать сварные соединения с удовлетворительными механическими свойствами при использовании электродов (пластин, плавящихся мундштуков, электродных проволок) того же состава, что и ОМ, несмотря на крупнокристаллическую мартенситоподобную структуру металла швов. При ЭШС высокопрочных двухфазных ($\alpha + \beta$)-сплавов электродами, близкими по составу к ОМ, получить необходимые механические свойства сварных соединений не всегда удается, особенно при необходимости подвергать сварные соединения упрочняющей термической обработке. В этом случае следует изыскать оптимальный состав металла шва, отличный от состава ОМ. Наиболее перспективным способом измельчения крупнокристаллической структуры наплавленного металла является воздействие на сварочную ванну внешнего магнитного поля.

Среди способов сварки плавлением все большее место занимают лучевые способы. Для соединений титана наибольшее применение нашла электрон-

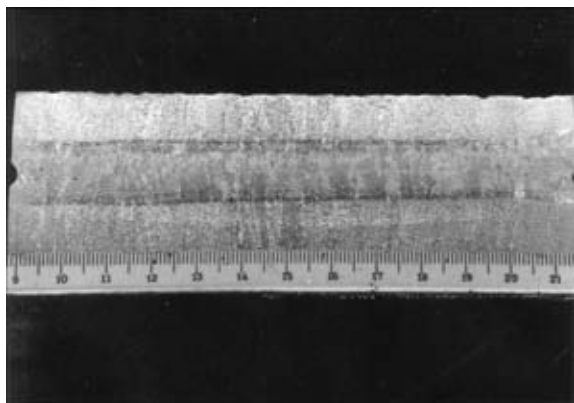


Рис. 8. Макрошлиф стыкового сварного соединения сплава ВТ6 толщиной 120 мм, выполненного ЭЛС горизонтальным лучом

но-лучевая сварка (ЭЛС) [3–5, 8]. ЭЛС титана осуществляют в вакууме (при давлении остаточных газов от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 Па), что создает экологически чистые условия производства, высокий уровень комфортности эксплуатации оборудования, однако требует высокой степени механизации и автоматизации всех операций. Высокая концентрация энергии в электронном пучке (наибольшая плотность мощности $5 \cdot 10^7$ Вт/см²), локальность нагрева металла (наименьшая плотность поперечного сечения $1 \cdot 10^{-4}$ см²), минимальная деформация свариваемого металла, вакуумная защита зоны сварки и остывающих участков шва, дистанционность ведения технологического процесса, точная управляемость пространственно-энергетическими параметрами электронного луча, высокий КПД и низкие эксплуатационные расходы (при значительных первоначальных капитальных вложениях), а также хорошие механические свойства сварных соединений, выполненных способом ЭЛС, определяют ее конкурентоспособность и перспективность. При ЭЛС титана для получения качественных швов требуется более высокая точность сборки изделий под сварку по сравнению с дуговыми процессами сварки плавлением, а также строгое соблюдение допустимых размеров зазора между кромками. Поэтому в ряде случаев ЭЛС выполняют по утолщенным кромкам, которые после окончания процесса сварки убирают с помощью механической обработки.

ЭЛС титана характеризуется глубоким проплавлением при низких значениях погонной энергии. Минимальная зона расплавления при ЭЛС приводит к значительному уменьшению деформации изделий по сравнению с другими способами сварки плавлением. При ЭЛС титана можно выполнять швы принципиально новых видов, например, соединение элементов конструкций, расположенных на разной высоте, сварку в щелях, а также прорезные швы, при которых непосредственному воздействию источника нагрева доступен верхний элемент. ЭЛС изделий из титана осуществляют в нижнем положении, а также горизонтальным лучом со сквозным проплавлением. При этом шов может выполняться на горизонтальной или вертикальной плоскостях. Горизонтальное расположение сварочной ванны обеспечивает получение качественного формирования швов с практически параллельными границами на листах сплава титана при $b \geq 100 \dots 150$ мм (рис. 8).

α - и псевдо- α -сплавы титана, а также сплавы со стабильной β -структурой характеризуются хорошей свариваемостью способом ЭЛС. Термический цикл ЭЛС обеспечивает сварным соединениям высокие показатели пластичности и вязкости. Сварные соединения ($\alpha + \beta$)-сплавов титана, полученные способом ЭЛС, отличаются удовлетворительными механическими свойствами. При ЭЛС сплавов наиболее распространенным дефектом сварных соединений является пористость — главная причина усталостного разрушения сварных изделий.

В последние годы для сварки титана и его сплавов нашла применение лазерная сварка [25–

28]. Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, в чем существенно превосходит другие источники энергии, используемые для сварки (наименьшая площадь поперечности сечения лазерного луча $1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$, наибольшая плотность мощности $1 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$). При лазерной сварке (ЛС) титана в отличие от ЭЛС не требуется вакуумных камер. Процесс ЛС осуществляется в защитных газах — аргоне и гелии, поэтому она применима для соединения элементов конструкций любых габаритов. Особенностью лазерного излучения является простота его транспортировки — с помощью зеркальных оптических систем оно может быть направлено в труднодоступные места, подано на значительные расстояния без потерь энергии, одновременно или последовательно использовано в нескольких рабочих местах. Такие особенности лазерного излучения создают возможность легкого и оперативного управления процессом ЛС. К тому же на лазерный луч не оказывают влияния магнитные поля технологической оснастки. Это позволяет получить качественное формирование сварного шва по всей его длине.

Для сварки листов титана толщиной от 0,2 до 25,0 мм нашли применение твердотельные и газовые лазеры в режимах импульсно-периодического и непрерывного действия. Процессы автоматической и ручной ЛС малых толщин осуществляются как в непрерывном, так и в импульсном режимах (шовная и точечная сварка). Способ сварки ЛС с глубоким проплавлением выполняется только в автоматическом режиме. При сварке титана особенно заметны преимущества ЛС с глубоким проплавлением. Сравнение ЭЛС и ЛС по технологическим и экономическим характеристикам показало, что для сварки листов металла при $b \leq 5 \text{ мм}$ (мощность излучения до 4 кВт) предпочтительнее способ ЛС, а для сварки листов титана при $b \geq 10 \text{ мм}$ (мощность излучения более 10 кВт) экономически выгоднее ЭЛС. Способ ЛС требует точности направления и стабильности воздействия лазерного излучения. Сварные швы, выполненные способом ЛС, отличаются высоким качеством, что в большинстве случаев исключает их последующую обработку. Механические свойства сварных соединений титана, выполненных ЛС, находятся на уровне свойств ОМ. К недостаткам ЛС относится высокая стоимость источников лазерного излучения. Существенной проблемой, возникающей при ЛС титана, является образование пор в корневой части шва вследствие резкого изменения уровня растворимости газов при быстром охлаждении и затвердевании металла.

Для ионно-лучевой сварки титана в вакууме с управляемым выделением из шва газов (кислорода, азота) предложено использовать плотные ионные потоки. С помощью электронно-ионной сварки возможно легирование металла шва. Однако эти способы сварки в настоящее время не нашли практического применения [29, 30] так же, как и способ сварки световым лучом [31].

Создание сварных конструкций с высокими техническими и экономическими показателями всегда

связано с необходимостью выбора способа сварки, наиболее соответствующего конкретным условиям производства и эксплуатации изготавливаемых изделий. Правильный выбор способа сварки обуславливает качество и эффективность выполнения конкретных сварных соединений, что впоследствии сказывается на техническом уровне производства сварных изделий, а также их работоспособности и долговечности. Современные способы сварки плавлением позволяют успешно соединять листы титана толщиной от долей миллиметра (лазерная и микроплазменная) до десятков сантиметров и более (ЭЛС и ЭШС).

Для выбора технологии сварки или ее усовершенствования разработаны и нашли применение в промышленности несколько версий функционально-стоимостного анализа (ФСА), под которым подразумевается метод системного исследования объекта (изделия, процесса, структуры), направленный на выявление и использование резервов совершенствования. Главное исходное положение ФСА — в каждом объекте имеются функционально-избыточные затраты, которые можно выявить, устранить или использовать более эффективно [32].

1. Горькин И. В., Гечулин Б. Б. Титан в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1990. — 400 с.
2. Изготовление и эксплуатация оборудования из титана / Г. М. Шеленков, В. Е. Блащук, Р. К. Мелехов и др. — Киев: Техника, 1984. — 120 с.
3. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
4. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
5. Zamkov V. N., Prilutskii V. P., Shevelev A. D. Metallurgy and technology of welding titanium alloys // Welding and Surfacing Reviews. — 1992. — Vol. 2. — P. 1–39.
6. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении / Под ред. А. Г. Братухина. — М.: Машиностроение, 1997. — 600 с.
7. American Welding Society: Welding handbook. — Miami: American Welding Society, 1998. — Vol. 4. — 621 p.
8. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
9. Specialized gas shielding for titanium // Welding J. — 2000. — № 3. — P. 56.
10. Сварка погруженным вольфрамовым электродом сплава ВТ20 по необработанным кромкам / Б. И. Долотов, В. И. Муравьев, Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин // Свароч. пр-во. — 1997. — № 7. — С. 25–27.
11. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
12. Замков В. Н., Топольский В. Ф., Куширченко Н. А. Двухдуговая сварка толстолистового титана вольфрамовыми электродами // Автомат. сварка. — 1978. — № 2. — С. 44–47.
13. Белоус В. Ю. Дуговая сварка в узкий зазор титановых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — № 9. — С. 39–43.
14. Paton V. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // Welding J. — 1996. — № 5. — P. 37–41.
15. Царюк А. К. Сварка труб с трубными досками (Обзор) // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 25–29.
16. Никитин В. Б., Степанов В. И. Изготовление теплообменного аппарата с использованием титановых сплавов для ТЭС «Альхольма» // Технология машиностроения. — 2001. — № 2. — С. 53–57.
17. Customized orbital welding meets the challenge of titanium welding // Welding J. — 1996. — № 12. — P. 39–41.
18. Царюк А. К. Оборудование для сварки труб с трубными досками // Сварщик. — 2000. — № 4. — С. 12–13.



19. Плазменная сварка титановых сплавов / В. Е. Блащук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 3. — С. 31–33.
20. Микроплазменная сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.
21. Неровный В. М. Дуговая сварка в вакууме титановых сплавов // Технология машиностроения. — 2001. — № 2. — С. 27–30.
22. Горбач В. Д., Хвалынский В. Н. Новые технологии изготовления несущих сферических конструкций изделий морской техники // Свароч. пр-во. — 2002. — № 7. — С. 28–33.
23. Замков В. Н., Лычко И. И., Топольский В. Ф. ЭПС плит из титанового сплава Grade 5 // Автомат. сварка. — 1999. — № 9. — С. 73–75.
24. Yushchenko K. A., Lychko I. I., Sushchuk-Slyusarenko I. I. Effective techniques of electroslag welding and prospects for their application in welding production. — 1999. — Vol. 12. — 108 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
25. Gedopt J., Delarbre E. Pulsed Nd: YAG laser welding of titanium EAR implants // Laser technologies in welding and materials processing: Proc. of Intern. conf., May 19–23, 2003, Katsiveli, Ukraine. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003. — P. 209–210.
26. Гагрилюк В. С., Жилкин А. М., Иванов Н. Л. Лазерная обработка материалов // Технология металлов. — 2000. — № 5. — С. 32–44.
27. Abbott D. H., Arcella F. G. Laser forming titanium components // Advanced Materials and Processes. — 1998. — 153, № 5. — P. 29–30.
28. Лазерная обработка материалов / М. М. Пронин, В. Н. Старцев, В. О. Попов и др. // Вопр. материаловедения. — 1999. — № 3. — С. 375–393.
29. Ионнолучевая сварка титанового сплава ВТ6 / М. Д. Габович, М. Н. Проценко, В. Я. Порицкий и др. // Автомат. сварка. — 1980. — № 2. — С. 69–70.
30. Габович М. Д., Хомич В. А., Назаренко О. К. Электронно-ионнолучевая сварка с легированием шва // Там же. — 1993. — № 10. — С. 49–50.
31. Разработка и развитие технологии сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // Свароч. пр-во. — 2003. — № 11. — С. 19–21.
32. Демчишев П. Г., Марьин С. Б. Экспресс-ФСА процесса сварки погруженным вольфрамовым электродом // Сварка в Сибири. — 2004. — № 1. — С. 31–34.

A review has been made of practical application of various processes of fusion welding of titanium and its alloys. Recommendations are given on application of the welding processes, and their advantages and disadvantages are noted.

Поступила в редакцию 15.05.2004,
в окончательном варианте 06.09.2004

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

В ИЭС им. Е.О. Патона разработан технологический процесс электродуговой наплавки коленчатых валов карбюраторных и дизельных двигателей автомобилей.

Целью разработки является восстановление рабочего ресурса коленчатых валов, вышедших из строя по причине износа рабочих поверхностей (коренных и шатунных шеек, поверхности под сальники, хвостовиков и фланцев), и возвращение их в эксплуатацию.



Технологический процесс восстановления состоит из следующих основных операций: предварительная термообработка для снятия усталостных напряжений, электродуговая наплавка изношенных рабочих поверхностей, повторная термообработка для снижения сварочных напряжений, механическая обработка (шлифование) наплавленных поверхностей до номинальных размеров.

В зависимости от химического состава металла коленчатого вала и типа двигателя автомобиля в качестве наплавочных материалов используют различные марки порошковых проволок и флюсов, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Основными технологическими приемами производства наплавки являются широкоослойная наплавка с колебаниями порошковой проволоки на всю ширину наплавляемой поверхности и наплавка по винтовой линии порошковой проволокой под флюсом.

03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
ИЭС им. Е. О. Патона, отд. № 23
Тел.: (38044) 227 61 57; 261 51 18

РЕЗКА ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂-ЛАЗЕРА КОРПУСОВ ДИСКОВЫХ ПИЛ

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук, А. Г. ЛУКАШЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что для изготовления корпусов дисковых пил из листа стали 65Г толщиной 2...6 мм предпочтительнее лазерная резка. Она обеспечивает высокое качество и малую ширину реза, малую ЗТВ и низкую себестоимость изделий. Отмечена перспективность разработки гибридной технологии лазерно-плазменной резки, при которой лазерное излучение стабилизирует дуговую плазму, дополнительно ее сжимает, заставляя проникать в образующийся при резке пародинамический канал.

Ключевые слова: лазерная резка, дисковые пилы, инструментальные стали, режимы, комплекс для резки, модернизация лазера, трехкоординатный манипулятор, резак, компьютерное управление

В современном производстве при подготовительных операциях для получения заготовок одним из основных процессов является раскройка листового металла, причем предпочтение отдается автоматическому резанию по произвольной траектории [1]. Нередко возникает необходимость выполнить отверстия в уже готовых изделиях. При этом недопустимы поводки и коробление, нежелательны также присущие механическим способам обработки усилия резания [2]. В ряде областей промышленности, например в кораблестроении, есть необходимость высококачественной резки толстых (до 100 мм) стальных листов, причем с достаточной производительностью [3]. В этом случае наиболее подходящим процессом, позволяющим одновременно сочетать качество реза практически любого материала в широком диапазоне толщин с высокой производительностью, является лазерная резка.

Характерный для современной украинской экономики переход на мелкосерийное производство делает нерациональным использование штампов, что заставляет применять на предприятиях механический, плазменный или лазерный раскрой металла. Последний имеет следующие преимущества [4]: широкий ассортимент разрезаемых материалов; получение тонкого реза благодаря острой фокусировке лазерного луча; малую зону термического влияния (ЗТВ); минимальное механическое воздействие на заготовку; химическую чистоту процесса резки; возможность его автоматизации; высокую производительность; возможность резки по сложному контуру в двух или трех измерениях. В результате могут быть изготовлены высокоточные заготовки с качественным резом, не требующие последующей обработки. При этом отсутствует механическая деформация заготовок, а из процесса разметки и резания исключается человеческий фактор.

Одной из актуальных для Украины задач является изготовление дисковых пил для резки древесины, камня, металлов. Применяемые в заго-

товительном производстве дисковые пилы имеют достаточно сложные контуры (рис. 1), что обусловливается снижением механических и динамических нагрузок на диск во время резки. Такие пилы могут работать при повышенной (до 3000 мин⁻¹) частоте вращения. Их изготовление включает следующие операции: предварительный раскрой листа инструментальной стали с учетом дальнейшей обработки; чистовое резание листа инструментальной стали по соответствующему профилю пилы контуру; термообработка типа нормализации (в случае необходимости); плоское шлифование заготовки дисковой пилы; напайка (приварка) твердосплавных сегментов. Одной из наиболее трудоемких и ответственных операций является чистовое вырезание профиля заготовки пилы из листа инструментальной стали (обычно стали 65Г). При этом толщину стального листа выбирают в зависимости от диаметра пилы (300...900 мм) в пределах 2...6 мм.

Для чистовой вырезки заготовок дисковых пил нами предложено использовать резку CO₂-лазером с мощностью излучения до 1 кВт. Такой способ резки является достаточно высокопроизводительным (скорость резки может составлять 1...5 м/мин) и позволяет получать малую шероховатость кромок реза (приблизительно $R_a = 2,5$ мкм). Нами проведены сравнительные эксперименты по отработке технологий лазерной и микроплазменной резки, благодаря которым определено, что с помощью мик-

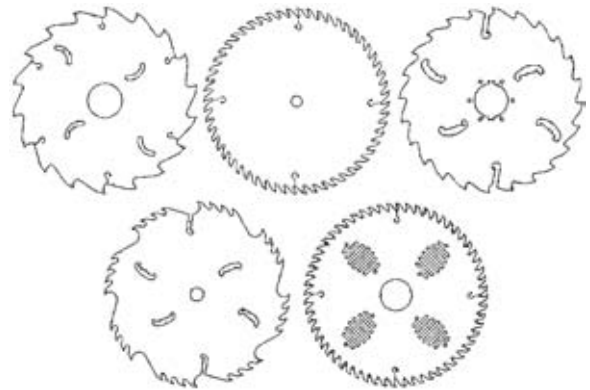


Рис. 1. Типы корпусов дисковых пил, применяемых в современном заготовительном производстве

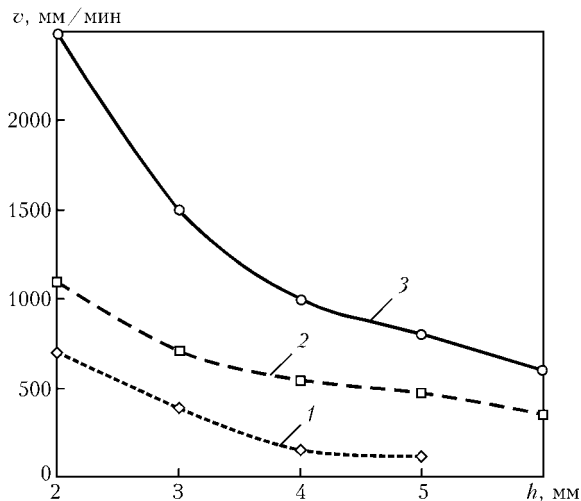


Рис. 2. Зависимость скорости v лазерной резки излучением CO_2 -лазера мощностью 700 Вт от толщины h разрезаемого листа стали 65Г при использовании в качестве режущего газа сжатого воздуха (1), воздушно-кислородной смеси в соотношении 3:1 (2) и кислорода (3)

роплазменной резки можно достичь более высоких скоростей процесса. Однако она имеет существенные недостатки — конусность реза составляет до 30° относительно вертикали, а ширина — 2,5...3,5 мм. Последнее особенно нежелательно в плане экологии, поскольку большое количество металла уходит в шлак и вредные аэрозоли, которые затем выбрасываются в атмосферу. Кроме того, при изготовлении заготовок дисковых пил, помимо получения вертикальных кромок (под углом, максимально близким к 90° относительно плоскости пилы) и тонких (шириной до 1 мм) прорезей, в местах последующей пайки твердосплавных сегментов необходимо обеспечение радиусов профили реза до 0,5 мм.

Исходя из перечисленных соображений выбрана технология лазерной резки, обеспечивающая ширину реза 0,5 мм. Она соответствует указанным требованиям к изготовлению заготовок дисковых пил. На рис. 2 представлена зависимость скорости резки от толщины разрезаемого листа стали 65Г, полученная при отработке технологии лазерной резки излучением CO_2 -лазера с модой TEM_{10} . Для реализации этой технологии в ИЭС им. Е. О. Патона разработан автоматизированный комплекс с компьютерным управлением (рис. 3). В качестве технологического лазера в состав комплекса входит



Рис. 3. Автоматизированный технологический комплекс для лазерной резки с компьютерным управлением на базе модернизированного CO_2 -лазера «Хебр-1А»

модернизированный нами болгарский лазер «Хебр-1А» выпуска 1989 г. мощностью до 1,3 кВт [5]. Для обеспечения стабильности его работы водоохлаждаемая система балластных сопротивлений заменена сопротивлениями типа ПЭВ с воздушным охлаждением, изменены также футеровка газоразрядной камеры и состав рабочей газовой смеси. Последнее является важным с экономических позиций эксплуатации лазера. Согласно паспортным данным, газовая смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ должна иметь пропорцию 1:10:30, поскольку в этом случае одного баллона гелия (наиболее дорогостоящего газа) хватает только на 40 ч работы. Указанная пропорция была нами изменена (1:6:4), что позволило увеличить продолжительность использования баллона гелия до 200 ч при мощности излучения лазера до 1 кВт. Таким образом, себестоимость 1 ч эксплуатации лазера была снижена в 5 раз.

В разработанном комплексе для перемещения «летающей» оптики использован трехкоординатный манипулятор «Гранит-1600» оригинальной разработки. Для перемещения балки (координата y) и каретки (координата x) по шлифованным гранитным направляющим используется сжатый воздух под давлением свыше 0,3 МПа и электродвигатели с линейно развернутым статором. Перемещение режущей головки (координата z) осуществляется электродвигателем с вращающимся ротором. Перемещение инструмента (режущей головки) по координатам составляет $x:y:z = 1500:1000:50$ мм при скорости работы в автоматическом режиме от 0,01 до 22,00 м/мин. Точность позиционирования инструмента — не хуже ± 3 мкм/м.

Для стабилизации положения фокуса относительно разрезаемого листа металла применен кольцевой емкостный датчик, расположенный вокруг режущего сопла. В оптическом тракте использованы два водоохлаждаемых поворотных зеркала из позолоченного кремния и фокусирующие линзы из монокристалла хлорида калия, имеющие фокусное расстояние 150, 200 и 300 мм. Для prolongации срока эксплуатации линз в лазерном резке собственной конструкции (рис. 4) предусмотрено их воздушное охлаждение.

Для управления лазерным комплексом использованы компьютер с частотой процессора не ниже 300 МГц и система ЧПУ. Управляющая программа, написанная под OS Windows, позволяет автоматически конвертировать в свой формат файлы чертежей, выполненных в программах AutoCAD 2000 и выше. В связи с этим нет необходимости конструкторские документы переводить в машинные коды.

Одним из ключевых моментов адаптации технологического процесса лазерной резки листов из стали 65Г к особенностям разработанного комплекса является подбор формы и диаметра режущего сопла, а также состава режущего газа. В качестве последнего использовали воздух, воздушно-кислородную смесь (в различных пропорциях) и чистый кислород (см. рис. 2). В ходе проведения экспериментов установлено, что целесообразно уменьшить диаметр режущего сопла приблизительно до диаметра проходящего через него сфокусирован-

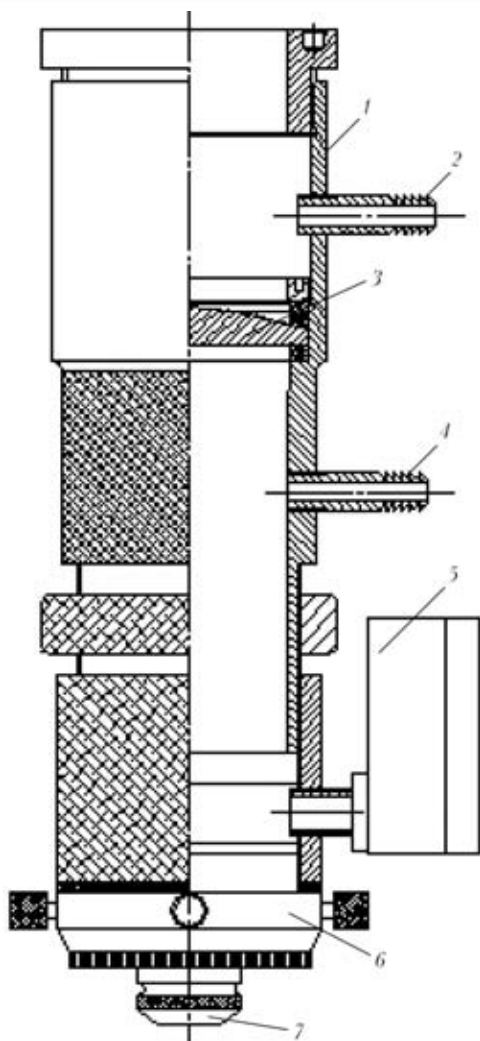


Рис. 4. Схема лазерного резака, применяемого в технологическом комплексе для лазерной резки корпусов дисковых пил: 1 — корпус; 2 — штуцер воздушного охлаждения линзы; 3 — фокусирующая линза; 4 — штуцер для подачи режущего газа; 5 — манометр; 6 — система центровки режущего сопла; 7 — режущее сопло

ного лазерного излучения (в нашем случае до 0,6 мм) и сделать его форму, максимально приближенной к форме сопла Лавала [6]. При этом выполнять резку следует с помощью чистого кислорода. Такой подход не только способствует повышению производительности, но и при сравнительно малых расходах кислорода (около 150...200 л/ч) позволяет сузить рез и свести до минимума размер грат на краях реза, а следовательно, уменьшить отходы и вредные аэрозоли, образующиеся при резке. Постоянное воздушное охлаждение верхней части линзы при периодической (совместно с лазерным излучением) подаче кислорода дает возможность избежать ее термического раскалывания, а уплотнение посадки линзы не позволяет смешиваться воздуху с кислородом. Эксперименты показали перспективность гибри-



Рис. 5. Корпус дисковой пилы диаметром 800 мм из листа стали 65Г толщиной 5 мм

ной лазерно-плазменной резки, при которой плазма проникает в пародинамический канал. Практическим примером лазерной резки является корпус дисковой пилы (рис. 5), вырезанной на созданном нами автоматическом комплексе.

Выводы

1. Для изготовления корпусов дисковых пил из листа стали 65Г толщиной 2...6 мм предпочтительной (несмотря на большую себестоимость лазерного оборудования) является лазерная резка в из-за более высокого качества и меньшей (в 4...6 раз) шириной реза. Применение лазерной резки позволяет уменьшить ЗТВ и исключить некоторые операции по доводке, что снижает себестоимость изготовления дисковых пил.

2. Уменьшение ширины реза существенно снижает количество шлама и вредных аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу. При серийном производстве этот фактор важен в плане экологии и его следует учитывать при выборе технологии и разработке оборудования.

1. Aichele G., Nickenig L. Laserstrahl-schneiden — Maschinenbauarten und zu trennende Werkstoffe // Praktiker. — 2003. — № 10. — С. 302, 304–306.
2. Муравьев В. И., Матвеев Д. В., Маркин Б. Н. Влияние газолазерного раскрая в среде технического азота на свойства сварных соединений из титановых сплавов // Сварка в Сибири. — 2003. — № 2(10). — С. 33–35.
3. Хенкок Р. Лазерно-кислородная резка стальных листов толщиной до 75 мм // Сварщик. — 2003. — № 6. — С. 18–19.
4. Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Кн. 7: Лазерная резка металлов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 127 с.
5. Технологические лазеры. Справочник: В 2 т. Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г. А. Абильситов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтьарь и др. / Под общ. ред. Г. А. Абильситова. — М.: Машиностроение, 1991. — 432 с.
6. Большая советская энциклопедия: В 30 т. — Изд. 3-е. — М.: Сов. энцикл., 1973. — Т. 14. — С. 242.

It is shown that laser cutting is preferable for manufacture of the cases of disc saws of a sheet of 65G steel 2 to 6 mm thick. This cutting technique provides a high quality and small width of the cut, minimum HAZ and low cost of the products. Good prospects for development of a hybrid technology of laser-plasma cutting are noted, where the laser radiation stabilizes the arc plasma, and constricts it further, driving the plasma into the keyhole formed in cutting.

Поступила в редакцию 01.06.2004



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОДАМИ С РУТИЛОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

И. Н. ВОРНОВИЦКИЙ, канд. техн. наук, **Н. В. ЗАХАРОВА**, **О. В. ШИШКОВА**, инженеры
(ЗАО «Электрод», г. Железногорск, РФ),
А. А. ВИЛИСОВ, **А. В. ЗИНЧЕНКО**, инженеры (Центр повышения квалификации кадров, Пермь, РФ)

Описаны технологические преимущества электродов с рутиловым типом покрытий для сварки высоколегированных сталей по сравнению с электродами с основным типом покрытия. Приведены сведения о новых марках электродов, разработанных в ЗАО «Электрод».

Ключевые слова: дуговая сварка, нержавеющие стали, покрытие электроды, рутиловый тип покрытия, технологические свойства

Специалисты ЗАО «Электрод» разработали несколько марок электродов с рутиловым покрытием для сварки высоколегированных сталей, которым присвоено буквенно-цифровое обозначение ЖЗЛ (ЖЗ — Железногорский завод; Л — для сварки высоколегированных сталей). В табл. 1 приведены некоторые характеристики электродов. ЗАО «Электрод» продолжает разработку и совершенствование электродов с рутиловым и иными типами покрытий для сварки высоколегированных сталей и сплавов, аналогами которых являются известные электроды ОЗЛ-17У, АНЖР-1, АНЖР-2 и др.

В последние двадцать–тридцать лет изменился характер использования электродов с рутиловым покрытием для сварки высоколегированных сталей по сравнению с электродами (того же назначения) с основным покрытием. На основании анализа информации [1–3] можно утверждать, что доля электродов с рутиловым покрытием за рубежом в общем объеме выпуска электродов для сварки высоколегированных сталей составляет примерно 80 %, остальное — электроды с основным и прочими покрытиями.

На постсоветском пространстве доля электродов с рутиловым покрытием для сварки высоколегированных сталей составляет всего около 10 %, хотя в течение нескольких десятилетий Московский

опытный сварочный завод, Институт электросварки им. Е. О. Патона и ряд других организаций [4, 5] активно занимались их разработкой и совершенствованием.

Преимуществом электродов с рутиловым покрытием является высокая технологическая маневренность, благодаря которой существенно облегчается труд сварщика, снижается трудоемкость при сварке, обеспечивается высокое качество сварных соединений.

Для рутиловых электродов характерны легкое зажигание и повторное зажигание дуги, возможность сварки как постоянным, так и переменным током, мелкокапельный перенос электродного металла и формирование гладкой мелкочешуйчатой поверхности металла шва, что в свою очередь способствует легкой, а зачастую самопроизвольной, отделимости шлака, коэффициент теплового расширения которого в 1,5 раза больше, чем основного шлака. Следует подчеркнуть незначительное разбрызгивание электродного металла. Все перечисленные свойства обеспечиваются благодаря тщательному подбору состава покрытия, содержащего значительную долю рутила или продуктов его переработки.

Другие функциональные свойства рутиловых электродов (возможность сварки тонколистовых конструкций, сварки вертикальных швов сверху вниз, повышенная производительность процесса) определяются диаметром электрода и толщиной

Таблица 1

| Новые марки электродов с рутиловым покрытием | Тип электродов (ГОСТ 10052-75) | Марки свариваемых сталей | Марки электродов-аналогов с основным покрытием |
|--|--------------------------------|---|--|
| ЖЗЛ-1 | Э-08Х17Н8М2 | 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н5 МЗ, 08Х16Н13М2Б | НИАТ-1 |
| ЖЗЛ-6 | Э-10Х25Н13Г2 | 10Х23Н18, 20Х23Н18, 08Х21Н6М2Т, 08Х23Н6 | ОЗЛ-6, ЦЛ-25 |
| ЖЗЛ-8 | Э-07Х20Н9 | 08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Б | ОЗЛ-8 |
| ЖЗЛ-11 | Э-08Х20Н9Г2Б | 08Х18Н12Б, 08Х18Н12Т | ЦЛ-11 |
| ЖЗЛ-15 | Э-08Х19Н10Г2Б | 12Х18Н12Т | ЦТ-15 |
| ЖЗЛ-400 | Э-07Х19Н11МЗГ2Ф | 08Х17Н13М2Т | ЭА-400/10У |
| ЖЗЛ-НЖ/13 | Э-04Х20Н9 | 06Х18Н11, 04Х18Н10 | УОНИ-13/НЖ-2, ОЗЛ-6 |
| ЖЗЛ-395 | Э-11Х15Н25М6АГ2 | ХН35ВТ, Х15Н25АМ6 | ЭА-395/9 |

(коэффициентом массы) покрытия. При этом формирование шва и ряд перечисленных выше показателей электродов зависят от поведения жидкого металла и шлака. В частности, вязкость рутиловых шлаков как нелегированных, так и легированных электродов больше, чем других типов шлаков промышленных электродов. Многие опытные сварщики научились правильно использовать это свойство шлака при сварке швов в различных пространственных положениях.

Характерной особенностью электродов с рутиловым покрытием является более высокое напряжение дуги, по сравнению с электродами с основным покрытием, при практически одинаковом сварочном токе (табл. 2).

Можно полагать, что температура дуги электродов с рутиловым покрытием выше, чем с основным, а скорость плавления электродов с рутиловым покрытием, как известно, больше, чем с основным покрытием. Эти факторы обуславливают необходимость корректировки конструкции разделки, например, размеров зазоров и притупления при сварке стыковых швов.

С целью разработки практических рекомендаций по сварке новыми электродами проведены специальные опыты, результаты которых приведены ниже.

Благодаря очень легкому зажиганию дуги практически мгновенно формируется сварочная ванна, форма, объем и масса которой легко поддаются регулированию за счет сварочного тока и скорости перемещения электрода. При этом регулируется и подвижность ванны, исключается вытекание металла из ванны и легко обеспечивается формирование шва во всех пространственных положениях. Этому также способствует образующийся при плавлении электродов довольно вязкий шлак. Именно вязкость шлака препятствует вытеканию жидкого металла из зазора при сварке корневых швов, что позволяет обеспечить при достаточных навыках сварщика формирование обратного валика или иной, заданной нормативной документацией, формы.

В результате дополнительных опытов установлено, что при чрезмерной толщине покрытия часть образующегося шлака затекает перед сварочной ванной и тогда затрудняется наблюдение за формированием шва. Это может привести к нарушению его прямолинейности и формы.

Установлено также, что при сварке новыми электродами формируется стабильная, легко управляемая дуга, допускающая манипулирование торцом электрода в самых неудобных для сварщика положениях и во всех положениях шва.

Легкое повторное зажигание дуги обеспечивает возможность выполнения вертикальных и потолочных швов в непрерывном и пульсирующем режимах, т. е. с кратковременными обрывами дуги,

Таблица 2

| Диаметр электрода, мм | Рекомендуемый сварочный ток для электродов, А, с покрытием | | Напряжение на дуге при сварке электродами, В, с покрытием | |
|-----------------------|--|-----------|---|-----------|
| | основным | рутиловым | основным | рутиловым |
| 2,00 | 40...65 | 45...65 | 22 | 29 |
| 2,50 | 50...85 | 60...90 | 22 | 29 |
| 3,25 | 85...115 | 80...120 | 21 | 30 |
| 4,00 | 105...160 | 120...170 | 21 | 32 |

обеспечивая симметричное формирование швов заданного размера (ширины и толщины). Этот прием (кратковременные обрывы дуги) обеспечивает возможность сварки тонколистового металла, тонкостенных труб, формирования корневого слоя шва с чрезмерным или переменным зазором по периметру трубы (вследствие неточной сборки и подготовки стыков труб к сварке).

Возможность сварки на переменном токе позволяет использовать (особенно в условиях монтажа и ремонта) простое и доступное оборудование.

Легкая или самопроизвольная отделимость шлака существенно снижает трудоемкость сварочных работ, а также уменьшает вероятность образования шлаковых включений. Однако сварщик должен помнить о некоторой опасности травмирования глаз (особенно), если эффект самоотделения шлака проявляется очень активно.

Испытания электродов ЖЗЛ выявили несколько повышенную чувствительность электродов к перегреву. Поэтому сварку следует выполнять в диапазоне токов, рекомендованных для каждого диаметра электродов, при контролируемых показаниях амперметра.

Как уже отмечалось, в нашей стране широкое применение электродов с рутиловым покрытием для сварки высоколегированных сталей несколько задержалось. Вероятно, одной из причин этого следует признать недостаточную информированность потребителей и сварщиков о технологических особенностях электродов с рутиловым покрытием, завоевавших признание во многих странах. Авторы выражают надежду, что предлагаемая статья выполнит положительную роль в успешном освоении нового прогрессивного материала, каким являются высоколегированные электроды с рутиловым покрытием.

1. *Schweißgeräte* und Schweißzusätze: Lincoln Smitweld GmbH. Katalog. — Netherlande, 2001. — 414 S.
2. *Consumable for manual and automatic welding: Welding handbook*. — Göteborg: ESAB, 2001. — 445 p.
3. *Welding consumable guide* / Zika. — Israel, 2001. — 84 p.
4. *Судлин З. А.* Высоколегированные сварочные электроды // Свароч. пр-во. — 1985. — № 2. — С. 3–5.
5. *Липодаев В. Н., Каховский Ю. Н.* Разработка электродов для сварки стабильноаустенитных сплавов — ЭП943 и ЭП516 // Всесоюз. конф. по свароч. материалам (Киев, 5–7 окт. 1976): Тез. докл. — Киев, 1976. — С. 27–29.

The paper presents the technological advantages of rutile type electrodes for high-alloy steel welding, compared to electrodes with a basic coating type. Information is given on the new grades of electrodes, developed at CJSC «Electrod».

Поступила в редакцию 22.07.2004



ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПЛАКИРОВАНИЕМ ВЗРЫВОМ

С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ, инж., Л. Д. ДОБРУШИН, С. Г. ПОЛЯКОВ, доктора техн. наук, Г. Е. БОЕВА, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведена оценка эффективности использования сварки взрывом для плакирования чистым алюминием сварных соединений алюминиевых сплавов 7010 и 2024. Показано, что при такой защите швов исключается возникновение коррозионного растрескивания под напряжением и межкристаллитной коррозии.

Ключевые слова: сварка взрывом, плакирование взрывом, сварка трением с перемешиванием, высокопрочные алюминиевые сплавы, сварные соединения, коррозионное растрескивание под напряжением, межкристаллитная коррозия

Сварные соединения алюминиевых сплавов обладают пониженной коррозионной стойкостью по сравнению с основным металлом, что обусловлено их физико-механической и электрохимической неоднородностью. Последняя особенно характерна для сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов.

С целью предотвращения контакта коррозионной среды с поверхностями шва и зоны термического и термомеханического влияния по заказу фирмы «Airbus Industrie» проведены исследования по локальному плакированию взрывом технически чистым алюминием швов, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП). Это относительно новый способ сварки, запатентованный в 1991 г. Британским институтом сварки. Суть его заключается в том, что специальный вращающийся инструмент внедряется в заготовки в месте расположения стыка. В результате трения выделяется тепло, что приводит к пластификации металла вокруг инструмента, после чего ему или заготовкам сообщают поступательное движение. Металл огибает штырь инструмента и, перемещаясь из зоны нагрева в зону охлаждения, образует соединение. Этот способ характеризуется высокими технологическими возможностями и позволяет получать соединения из широкого спектра алюминиевых сплавов, в том числе термически упрочняемых, а также из сталей и меди [1].

Ранее в ИЭС им. Е. О. Патона исследовали антикоррозионное плакирование взрывом сварных швов реакционных стаканов автоклавов для получения концентрированной азотной кислоты [2]. Аппараты были изготовлены из технического чистого алюминия марки А85 с применением сварки плавлением. Плакирование осуществляли сплавом А85. В результате долговечность реакционных стаканов автоклавов возросла примерно в 6 раз, что доказывает правильность предложенного подхода.

Целью настоящей работы является оценка эффективности использования сварки взрывом (СВ) для плакирования СТП соединений высокопрочных алюминиевых сплавов технически чистым алюминием для повышения их коррозионной стойкости.

Объектом плакирования взрывом и последующих испытаний являлись:

стыковые соединения плит из алюминиевого сплава 7010 Т7651 толщиной 65 мм ($\sigma_B = 520...525$ МПа; $\sigma_{0,2} = 455...465$ МПа, $\delta = 12...12,5\%$), выполненные СТП на глубину до 13 мм;

стыковые соединения листов из алюминиевого сплава 2024 Т351 толщиной 4 мм ($\sigma_B = 435$ МПа, $\sigma_{0,2} = 280$ МПа, $\delta = 15\%$), выполненные СТП на всю толщину пластин.

Плакирование осуществляли листами толщиной 2 мм из сплава 1050 (аналог АД0). Предварительный металлографический анализ сварных образцов показал, что в зоне термомеханического влияния СТП соединений сплава 7010 имеются участки с зернами, ориентированными перпендикулярно к поверхности пластины и находящимися на глубине 5 мм. Такое расположение зерен в наибольшей мере способствует развитию межкристаллитной коррозии (МКК), поэтому для того, чтобы такие участки оказались на поверхности, был удален слой металла толщиной 5 мм. Кроме того, со стороны корня СТП шва сделана выемка для удаления острого концентратора, вызванного неполным проваром по толщине пластины.

Учитывая необходимость плакирования протяженных СТП соединений, использовали параллельную схему СВ, когда плакирующая пластина перед сваркой располагается параллельно плакируемой поверхности. По сравнению с часто используемой угловой схемой она проще в монтаже и характеризуется равенством скорости детонации взрывчатого вещества D и скорости точки контакта V_K свариваемых поверхностей. Так как качественное соединение для данных пар металлов реализуется при $V_K \approx 2$ км/с, то взрывчатым веществом была выбрана смесь аммонита № 6ЖВ с аммиачной селитрой. Скорость соударения двух пластин, определенная по зависимостям из работы [3], составляла примерно 500 м/с. Критериями

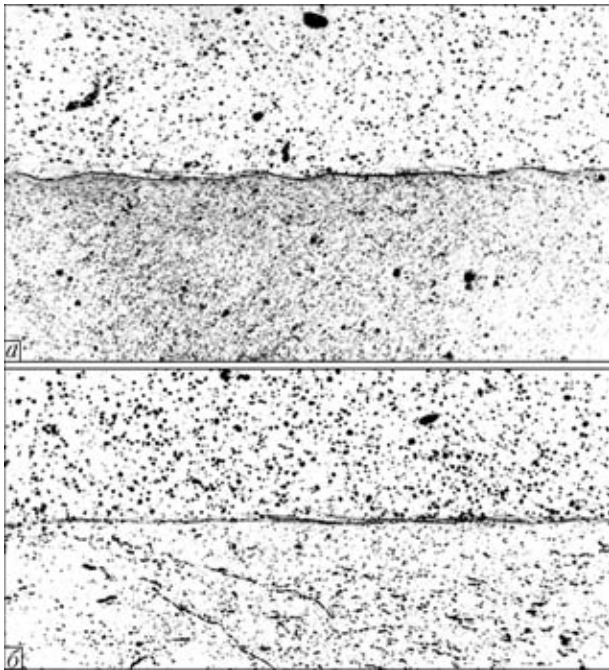


Рис. 1. Микроструктуры зоны соединения плакирующего слоя и металла СТП, шва сплава 7010 (а) и 2024 (б) X100

качества полученного соединения являлись его равнопрочность с металлом плакирующего слоя (сплав 1050), а также отсутствие на границе соединения включений литого металла. На рис. 1 приведены микроструктуры соединений соответственно плакирующего слоя и металла СТП шва сплава 7010 в продольном направлении относительно процесса СВ и плакирующего слоя и металла СТП шва сплава 2024.

Необходимо отметить, что в качестве плакирующего слоя желательно использовать как можно более пластичный металл. Поэтому сплав 1050 перед СВ подвергали отжигу. Кроме того, это способствовало меньшей деформации плакируемых пластин (особенно это актуально для сплава 2024, толщина которого составляла примерно 4 мм). На рис. 2 представлены плакированные взрывом образцы СТП соединений. Для сравнительной оценки коррозионной стойкости плакированных и неплакированных (исходных) СТП соединений проведены испытания на сопротивление коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) и МКК. Испытание СТП соединений алюминиевого сплава 7010 проводили по стандартам ASTM G 39 [4] и ASTM G 44 [5]. Образцы испытывали при нагружении по четырехточечной схеме (рис. 3), при этом нагрузку задавали величиной максимального отклонения y , которое определяли по формуле

$$y = \frac{\sigma(3H^2 - 4A^2)}{12Et},$$

где σ — задаваемая нагрузка (принимали равной $0,75\sigma_T$ для неплакированных СТП соединений), МПа; E — модуль упругости, МПа; t — толщина образца, мм; H — расстояние между внешними опорами, мм; A — расстояние между внутренней и внешней опорами, мм.

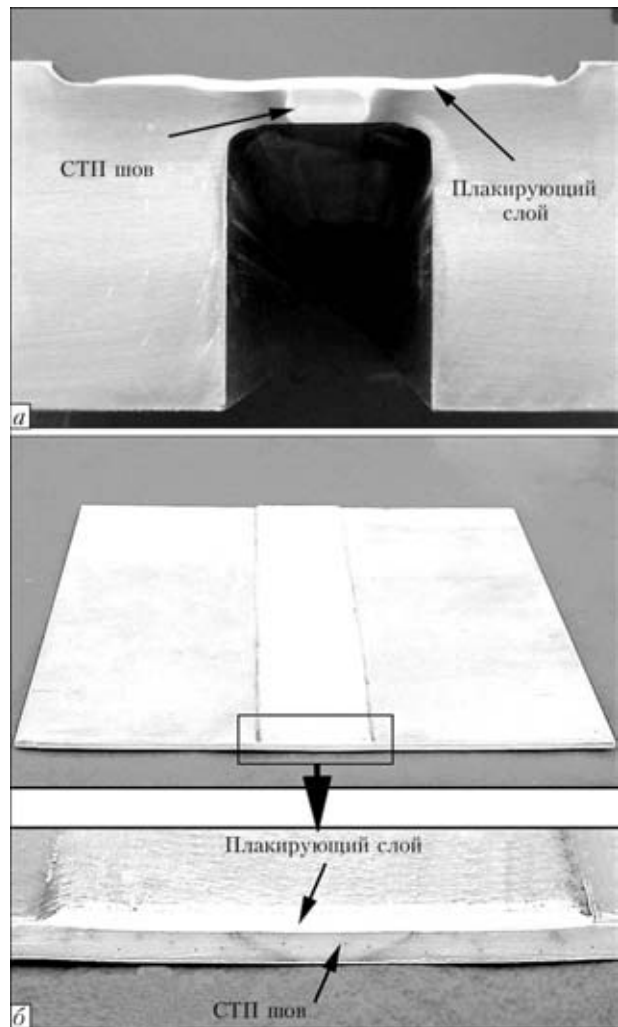


Рис. 2. Плакированные взрывом образцы СТП соединений сплава 7010 (а) и 2024 (б)

Образцы периодически погружали в химический раствор 3,5 % NaCl (рН 6,4...7,2) и проводили испытания по следующему циклу: 10 мин в растворе, 50 мин на воздухе. Продолжительность испытаний составляла 40 дней. Образцы вырезали таким образом, чтобы их длина составляла 120 мм (поперек СТП соединения и направления процесса плакирования), ширина 15 мм (вдоль соединения) и толщина 4 мм. Для того чтобы защитить образцы от воздействия коррозионной среды с торцевых и нижней поверхностей СТП соединений использовали эмаль ЭП-5147 (ТУ У 6.24514086-004-98 «А»).

Испытание СТП соединений алюминиевого сплава 2024 на КРН проводили по стандартам ASTM G 49 [6] и ASTM G 44, на МКК — по

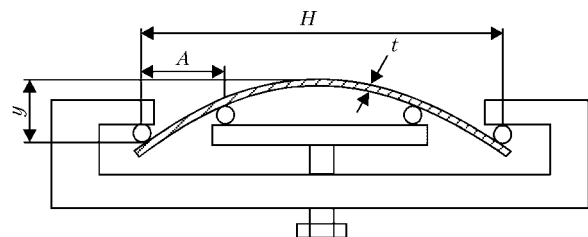


Рис. 3. Схема закрепления образца сплава 7010 для испытания на КРН (обозначения см. в тексте)

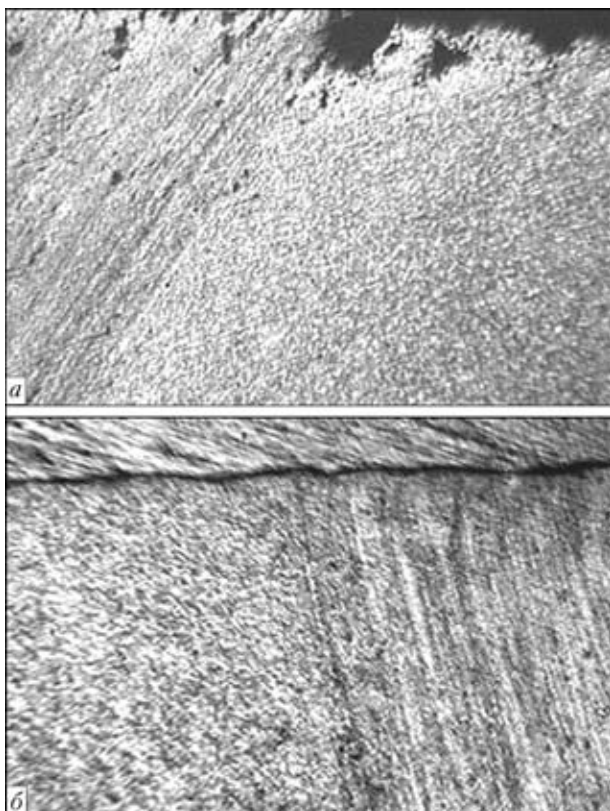


Рис. 4. Микроструктура зоны термомеханического влияния исходного (а) и плакированного (б) СТП соединения сплава 7010 после испытания на КРН, $\times 100$

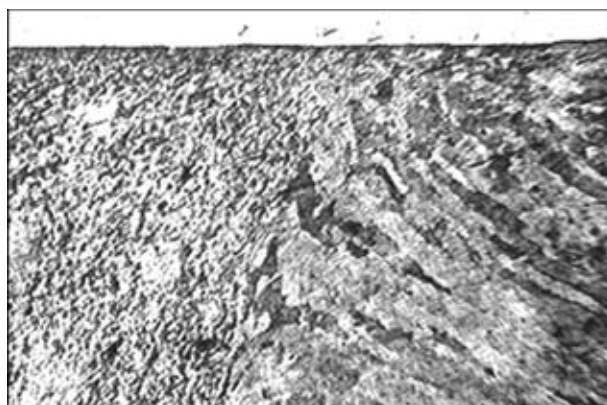


Рис. 5. Микроструктура зоны термомеханического влияния плакированного СТП соединения сплава 2024 после испытания на КРН, $\times 100$

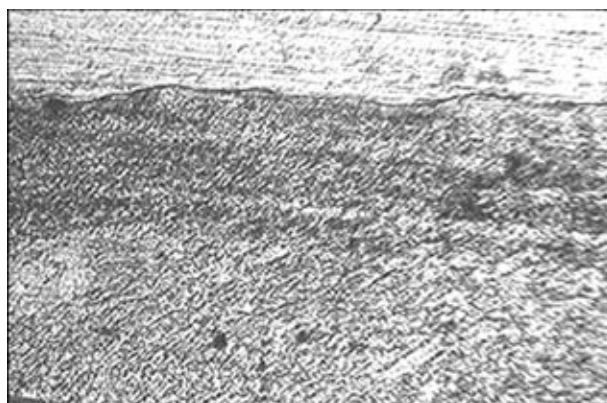


Рис. 6. Микроструктура плакированного СТП соединения сплава 2024 после испытания на склонность МКК, $\times 100$

стандартам ASTM G 110-92 [7] и QVA-Z10-59-03 [8].

Испытуемые на КРН образцы находились под постоянной растягивающей нагрузкой, которая (как и для образцов с СТП соединением сплава 7010) задавалась равной $0,75\sigma_t$ для исходных неплакированных соединений. Режим испытаний плакированных и неплакированных соединений СТП сплава 2024 был таким же, как и для соединений СТП сплава 7010, за исключением того, что длительность их выдержки под напряжением и в коррозионной среде составила 30 дней. Образцы для испытания на МКК вырезали таким образом, чтобы их длина была 70 мм (поперек соединения СТП и направления процесса плакирования), а ширина — 50 мм (вдоль соединения). Образцы помещали в коррозионный раствор (57 г NaCl + 10 мл H_2O_2 (30 %) + 1000 мл H_2O) и выдерживали в нем 6 ч при температуре 30 °С.

В течение испытаний образцов сплава 7010 (исходных и плакированных) на КРН их полного разрушения не произошло. Исходные образцы с СТП соединением сплава 7010 были полностью покрыты продуктами коррозии. На поверхности плакирующего слоя из сплава 1050 следов коррозии не наблюдается, в то время как на незащищенной части плакированных образцов (основной металл) присутствуют такие же следы коррозии, как и на исходных образцах. Как показал металлографический анализ исходных образцов после проведения испытаний, все они подвержены МКК. Типичная глубина проникновения МКК в наиболее

опасной зоне термомеханического влияния 150...160 мкм (рис. 4, а), а в одном случае из всей серии образцов она составляла 720 мкм. В плакированных образцах никаких следов коррозии СТП соединения обнаружено не было (рис. 4, б). Таким образом, присутствие плакирующего слоя из технического чистого алюминия полностью исключает какое-либо воздействие коррозионной среды на защищаемый шов.

При испытаниях на КРН при одноосной растягивающей нагрузке образцов соединения сплава 2024 исходные образцы разрушились в течение испытательного срока. На поверхности плакирующего слоя отмечали наличие питтинговой коррозии, при отсутствии нагрузки она вообще не наблюдалась. Под плакирующим слоем металлографический анализ показал отсутствие коррозии СТП соединения (рис. 5). Таким образом, несмотря на поверхностную питтинговую коррозию плакирующего слоя, последний выполнил свою функцию.

Испытание на МКК показало, что в плакированных образцах следы коррозии полностью отсутствуют (рис. 6). В исходных образцах в зоне шва глубина проникновения коррозии составляет 43 (рис. 7), а в зоне термомеханического влияния — 72 мкм.

В заключение следует отметить, что в плакированных взрывом СТП соединениях сплавов 7010 и 2024 следы коррозии после испытаний на КРН отсутствуют, в то время как в неплакированных

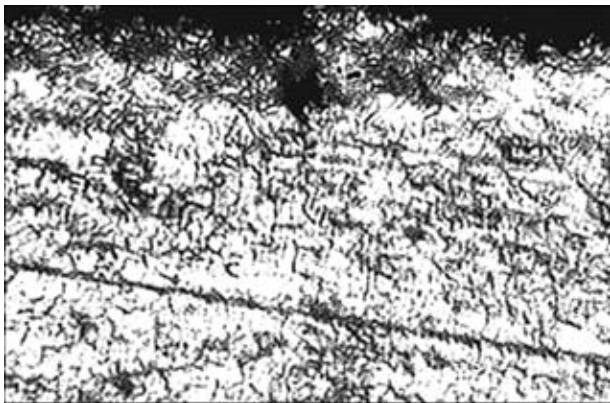


Рис. 7. Микроструктура исходного СТП соединения сплава 2024 после испытания на МКК, $\times 100$

соединениях сплава 7010 глубина проникновения МКК составляет 150... 160 мкм, а соединения сплава 2024 разрушились. Кроме того, при испытаниях на МКК даже при отсутствии нагружения глубина проникновения коррозии в СТП соединения сплава 2024 достигает 72 мкм.

Evaluation of explosion welding application was conducted for the case of cladding welded joints of aluminum alloys 7010 and 2024 with pure aluminium. It is shown that such a protection of welds prevents stress corrosion cracking or intercrystalline corrosion.

Проведенные исследования показали высокую эффективность предложенного метода защиты сварных соединений, полученных СТП, высокопрочных алюминиевых сплавов от воздействия коррозии, что позволяет рекомендовать его для использования на практике.

1. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — № 7. — С. 10–18.
2. Коррозионная стойкость сварных соединений алюминия после плакирования взрывом / В. Г. Петушков, М. И. Зотов, С. Г. Поляков и др. // Там же. — 1989. — № 1. — С. 21–24.
3. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 166 с.
4. ASTM G 39: Standard practice for preparation and use of bent-beam stress-corrosion test specimens.
5. ASTM G 44: Standard practice for evaluating stress-corrosion cracking resistance of metals and alloys by alternate immersion in 3,5% sodium chloride solution.
6. ASTM G 49: Standard practice for preparation and use of direct tension stress-corrosion test specimens.
7. ASTM G 110: Standard practice for evaluating intergranular corrosion resistance of heat-treatable aluminum alloys by immersion in sodium chloride + hydrogen peroxide solution.
8. QVA-Z10-59-03: Intergranular corrosion test for age-hardenable aluminium alloys.

Поступила в редакцию 28.05.2004

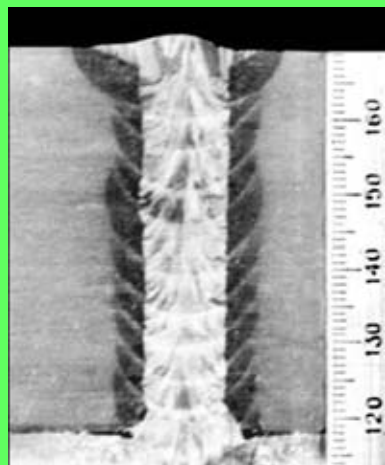
СВАРКА ТИТАНА В УЗКИЙ ЗАЗОР ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В АРГОНЕ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ

Сварка осуществляется в узкий зазор (8–10 мм) вольфрамовым электродом диаметром 4–5 мм в защитной атмосфере аргона в переменном магнитном поле, обеспечивающим перемещение дуги с одной вертикальной кромки на другую и равномерное их проплавление. Для заполнения зазора и получения шва применяется присадочная проволока диаметром 2,5–4,0 мм.

По сравнению с известными способами сварки титана большой толщины (погруженной дугой, MIG, ЭПС) данный способ сварки имеет следующие преимущества:

- более низкое тепловложение при сварке и сокращение протяженности зоны термического влияния;
- упрощение подготовки кромок и снижение стоимости подготовительных операций;
- уменьшение расхода сварочной проволоки и электроэнергии;
- обеспечение высокого качества сварных соединений независимо от толщины соединяемых элементов.

Назначение. Способ сварки предназначен для выполнения швов на титане и его сплавах при толщине свариваемых деталей от 20 до 110 мм.



03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
ИЭС им. Е. О. Патона, отд. № 30
Тел./факс: (38044) 227 13 66
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua



УДК. 621.791.3

ЛУЧЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ НАГРЕВА ДЛЯ ПАЙКИ (ОБЗОР)

А. М. ЖАДКЕВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности развития конструктивного оформления и применения технологий с использованием электронного луча, лазера, кварцевых ламп, а также солнечной энергии. Показано, что безынерционные источники нагрева обладают возможностью управлять тепловложением в широком диапазоне, что позволяет значительно расширить номенклатуру паяемых материалов. Отмечается, что техника пайки концентрированными источниками интенсивно развивается.

Ключевые слова: пайка, электронный луч, лазер, инфракрасное излучение, источник тепла, кварцевая лампа, история техники

В истории развития процессов соединения во второй половине XX в. начался период, который можно считать переходным, имея в виду переход к широкому использованию интенсивных процессов пайки. Это обусловлено появлением новых видов материалов и усложнением условий их эксплуатации. Качество соединений из новых материалов зачастую можно обеспечить лишь с помощью пайки. Однако при этом обнаружилось, что основным недостатком многих процессов пайки является химическая эрозия основного материала. Кроме того, среди других факторов, влияющих на интенсивность и глубину эрозии, большое значение имеет длительность пребывания припоя в жидком состоянии, интервал между солидусом и ликвидусом сплавов паяемый металл – припой [1, 2]. Таким образом, возникла потребность в развитии технологии пайки, основанной на концентрированных источниках нагрева.

С 1960-х годов технологическими особенностями пайки заинтересовались и проектировщики изделий разного назначения. Особые требования к концентрации тепловложения возникли в связи с микроминиатюризацией электронных приборов и минимизацией их массы в крупногабаритных конструкциях авиационно-космической техники, атомной энергетики и др. В ряде организаций СССР были развернуты комплексные научные исследования, конечной целью которых являлось обеспечение качества паяных изделий ответственного назначения из новейших материалов. При этом учитывались температурные условия, конструктивная приемлемость изделия, особенности металлургического взаимодействия паяемого металла, технологичность конструкции, выносливость соединений, их коррозионная стойкость и склонность к старению, требования к долговечности и надежности [3, 4].

Результаты, полученные в 1960-е годы, позволили СССР занять ведущее место в разработке и применении технологии высокотемпературной пайки специальных изделий, в том числе пайке

неорганических диэлектриков, керметов и других материалов с металлами. Были достигнуты высокая температуроустойчивость, механическая прочность и удовлетворен ряд других высоких требований, предъявляемых к сверхмощной электронике, электровакуумным СВЧ-приборам, мощным установкам ядерной энергетики, изделиям термоядерного синтеза и ускорительной технике и др. [5].

Несмотря на то что пайку лучевыми источниками энергии применяют уже несколько десятилетий, до настоящего времени не обобщены результаты исследований по технике пайки, истории развития технологий и оборудования. Так, в фундаментальной работе [6] о пайке лучевыми источниками ничего не говорится в обзорной главе. В этой и других обобщающих работах [1, 2, 4–6] не систематизированы данные и не приводятся сравнения особенностей и возможностей различных источников лучевого нагрева, не установлен диапазон их оптимального применения.

Целью настоящего обзора является ретроспективный анализ лучевых способов пайки, сравнение схем и принципов нагрева, анализ возможностей и особенностей техники пайки на конкретных примерах и результатах применения при производстве современных изделий.

Важнейшими свойствами основных лучевых технологий (сварка, пайка, термообработка, резка и пр.) являются высокая концентрация энергии, а также безынерционность источников нагрева изделий, возможность точного регулирования параметров режима. Электронный луч, имеющий универсальные возможности, находит широкое применение. В последние два десятилетия значительное внимание исследователи и производственники уделяли разработке лазерных технологий. Создание искусственных лучевых источников энергии обусловлено развернувшимися в начале XIX в. работами в области электричества, а во второй половине XIX в. — интенсивным исследованием физических явлений на молекулярно-электронном уровне. В частности, было открыто и нашло первое практическое применение тепловое действие электронных лучей и инфракрасного излучения. В первой половине XX в. сконструированы устройства для различных технологий обработки материалов,

а во второй половине разработаны и нашли широкое применение электронно-лучевая сварка, к концу века — лазерная сварка. Одновременно в ряде стран разрабатывалась технология пайки с применением этих же источников нагрева.

Электронно-лучевая обработка основана на нагреве изделия теплом, которое выделяется при торможении потока электронов, ускоренных до высоких энергий. Впервые электронные пучки наблюдал английский физик У. Крукс (1869) в виде голубого свечения вдоль газоразрядной трубки. Он же спустя десять лет установил, что катодные лучи могут плавить металлы, в том числе и тугоплавкую платину. Еще раньше, в 1852 г. с подобным сообщением выступил В. Г. Гроув в Лондонском королевском обществе. Однако только после открытия в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном электронов американский физик Р. Милликен отождествил сами лучи с потоком электронов. Формирование, фокусировка и отклонение электронных пучков привлекали внимание ученых многих стран. Уже в конце XIX в. началось практическое применение электронных пучков и возникло научное направление, получившее название электронной и ионной оптики. Идею отклонения электронного пучка реализовали в 1897 г. немецкий физик К. Ф. Браун (магнитным полем) и английский физик Дж. Дж. Томсон (электростатическим полем).

Эксперименты и попытки применения электронных лучей для плавки металлов продолжались и в XX в. Однако уровень развития вакуумной и электронной техники был еще недостаточен для развития промышленных технологий, основанных на преобразовании кинетической энергии потоков электронов в тепловую при взаимодействии с поверхностью нагреваемого тела. Только в начале 1950-х годов были созданы электронно-лучевые установки для плавки слитков ниобия и тантала. Создание высокопроизводительных вакуумных систем откачки, электронно-лучевых пушек, способных обеспечить стабильный технологический процесс, надежных систем питания и управления пушками ускорило внедрение электронно-лучевых установок в металлургию чистых металлов и сплавов [7].

Первые технологии и установки для электронно-лучевой сварки разработаны в 1950-х годах Дж. А. Старом, Дж. Бриолом (Франция), В. Л. Выменом (США) [8, 9], Н. А. Олышанским, Б. А. Мовчаном, Д. М. Рабкиным, С. М. Гуревичем, О. К. Назаренко, С. Д. Загребенюком (СССР) [10, 11]. За короткий срок разработаны способы формирования электронного пучка, конструкции электронно-лучевых установок с вакуумными камерами объемом до нескольких десятков кубометров, накидные камеры для локальной обработки, определены преимущества и область рационального применения электронно-лучевой сварки, налажено производство оборудования. Что касается технологии пайки, то электронно-лучевой нагрев (ЭЛН) начал одновременно использоваться для различных экспериментов пайки высокоточных изделий, собранных из тонкостенных и разнотолщинных эле-

ментов, а также изготовления узлов и конструкций из активных и тугоплавких металлов.

В ИЭС им. Е. О. Патона (В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский и др.) исследовали деформации, структурные изменения и другие характеристики некоторых способов пайки, выполняемых в вакуумной установке с кольцевым ЭЛН [12]. При этом удалось с достаточно высокой точностью осуществить циклический нагрев в различных температурных и временных интервалах. В Научно-исследовательском институте авиационной техники (А. Н. Кабанов, А. А. Кафаров и др.) разработано несколько моделей универсальных электронно-лучевых установок для прецизионной сварки, пайки и размерной обработки ЭЛУРО с возможностью регулирования общей и удельной мощности в пучке в широких пределах как в импульсном, так и непрерывном режимах (рис. 1) [13, 14]. Достигнутая удельная мощность $5 \cdot 10^8$ Вт/см² позволяла обрабатывать практически все существующие материалы. На установке ЭЛУРО изготавливаются специальные изделия электронной техники. Наличие микроскопа и механизма перемещения обеспечивает совмещение электронного пучка и зоны соединения с точностью ± 5 мкм при пайке золотых проволок диаметром 80 мкм к нихром-марганцевому серебру на стекле (толщина слоев составляет 30 и 800 нм; припоем служит слой серебра толщиной 600...800 нм) [15]. ЭЛН был использован при изготовлении сквозных выводов в диэлектрических и полупроводниковых материалах с высокой плотностью и точностью размещения. В этом случае на одной и той же установке сверлят от-

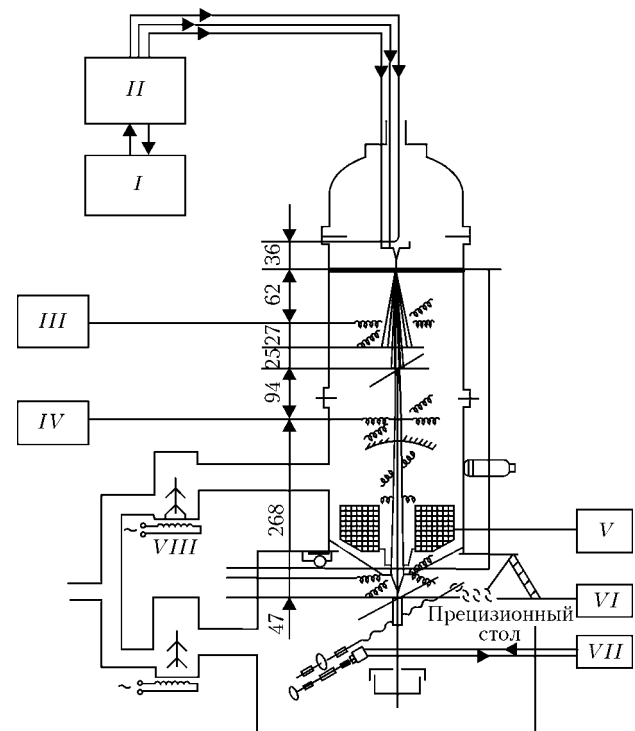


Рис. 1. Принципиальная схема установки ЭЛУРО: I — высоковольтный выпрямитель; II — стабилизатор напряжения, модулятор, блоки накала и напряжения смещения; III–V — источники питания юстирующих катушек стигматора и линзы; VI — блок питания растрового электронного микроскопа; VII — питание двигателей стола; VIII — откачная система

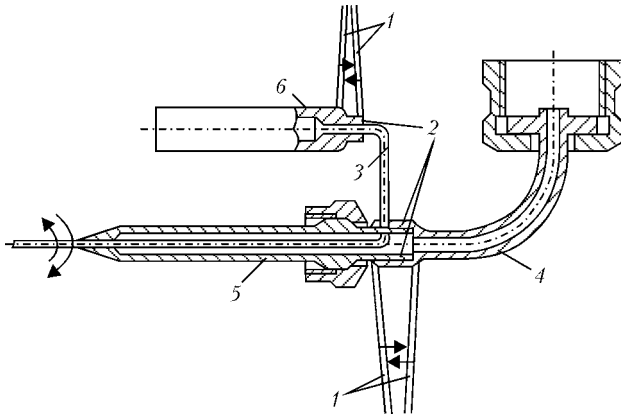


Рис. 2. Схема пайки узла медицинского инструмента: 1 — колеблющийся электронный пучок; 2 — цилиндр; 3 — игла; 4 — патрубок; 5 — рабочий цилиндр; 6 — припой

верстия (диаметром несколько десятков микрометров), в которые вставляют проволоочки (ковар и др.) и осуществляют пайку более «мягким» электронным пучком. При этом достигается высокая точность расположения выводов — при размещении пяти проволочек на 1 мм^2 отклонение от заданной геометрии составляло всего лишь 10 мкм [15]. Промышленностью и экспериментальными производствами исследовательских организаций налажен выпуск и других типов установок.

Для ЭЛН большой площади соединения применяют сканирование потока электронов. В установках типа ЭЛУ-4 для равномерного прогрева зоны пайки электронный пучок колеблется при подаче на отклоняющую систему пушки импульсов различной формы. На такой установке осуществляется пайка сложных узлов медицинских инструментов из коррозионностойких сталей (рис. 2) [16].

В конце 1980-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология пайки массивных деталей сложной конфигурации с использованием ЭЛН и низкотемпературных припоев [17]. В лабораторных условиях проведена пайка элементов космических конструкций из алюминиевых сплавов с никель-медным и никель-оловянным покрытием. Нагрев, продолжительность которого ограничивалась временем заполнения зазора припоем, осуществлялся расфокусированным пучком электронов при давлении в камере $1 \cdot 10^{-2}$ МПа. Высокая проплавляющая способность электронного луча использована при разработке технологии изготовления колес центробежных компрессоров, состоящих из двух дисков и помещенных между ними лопаток. Электронным лучом проплавляют покрывающий диск и расплавляют припой между диском и лопаткой [18].

Освоение космического пространства требует изготовления специальных конструкций из отдельных деталей на орбите. При этом, как и на Земле, в космосе одной из ведущих технологий соединения остается пайка. Однако условия выполнения пайки, как и ряда других технологий в космосе, значительно усложняются из-за отсутствия силы тяжести, наличия вакуума, необходимости работ в скафандрах, ограничения массы инструментов и

другого оборудования. Кроме того, в этих условиях все чаще используются также новые материалы, такие, как композиты с полимерными, керамическими, металлическими матрицами и углепластиками.

Первые в мире эксперименты по сварке в космосе выполнены в 1969 г. В. Н. Кубасовым на космическом корабле «Союз-6». На установке «Вулкан», созданной в ИЭС им. Е. О. Патона, испытаны процессы дугового и ЭЛН. Уже тогда установлено, что при работе за бортом космических аппаратов наиболее целесообразно использовать электронно-лучевую пайку [19]. Электронно-лучевые установки, нормально функционирующие в космическом вакууме, потребляющие минимальное количество энергии по сравнению с другим аппаратом, обеспечивают высокую термическую эффективность технологий сварки, пайки, напыления. Это подтвердилось при осуществлении эксперимента по пайке в открытом космосе [20].

В результате многолетних исследований, выполненных под руководством Б. Е. Патона в ИЭС им. Е. О. Патона (В. Ф. Лапчинский, Е. А. Аснис, А. А. Загребельный, В. Ф. Хорунов и др.), в РКК «Энергия» (Россия) (В. П. Никитский, А. В. Марков и др.) и в ряде других организаций, а также экспериментов на различных космических аппаратах, разработаны надежные оптимальные конструкции электронно-лучевых установок, технологий соединения и ремонта космических конструкций, типы соединений и др. Для проведения ремонтных работ не требуются остросфокусированные электронные пучки, поэтому в качестве источника ЭЛН для пайки была использована прямоканальная диодная пушка [21]. Коллективами этих же организаций разработаны конструкции орбитальных комплексов, крупногабаритных станций, при строительстве которых в космических условиях применяется пайка [22].

В основе оптических источников нагрева лежит ряд изобретений середины XIX в., приведших к созданию электрических источников освещения, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей. У источников осветительной техники стояли ученые и изобретатели многих стран (П. Н. Яблочков, В. Н. Чижевский, А. Н. Лодыгин, Т. А. Эдисон, В. Сван, И. Ленгмюр, Н. П. Бульгин и др.). Электрическое освещение, внедренное в первой половине XX в. в быт, является важнейшим и эффективнейшим показателем вклада электротехники в развитие цивилизации. Тепловое действие лучистой энергии осветительных приборов (как дуговых, так и накаливания), замеченное при решении проблем освещения, часто рассматривалось как «вредное явление». Тем не менее уже в начале XX в. лучистый нагрев начинают использовать в технологических целях: для сушки, плавления различных веществ и пр. Совершенствуются и соответствующие устройства: рефлекторы, печи [23]. Решение некоторых теоретических проблем теплового излучения света (излучение абсолютно черного тела) в 1900 г. М. Планком легло в основу современной квантовой физики. В частности, получил объяснение фотоэффект А. Г. Столетова. Нагрев объяснялся поглощением освещаемым телом энергии и импульсов

фотонов. При отражении от зеркала фотон изменяет свою энергию и импульс в соответствии с законами соударения двух материальных тел, но не теряет свою нагревательную способность [24].

Создание источника электромагнитного излучения видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов — оптического квантового генератора открыло новую эпоху в развитии техники. Первые квантовые генераторы в сантиметровом диапазоне волн (мазеры) появились в 1954 г. В 1960 г. советскими физиками Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым и американским физиком Ч. Таунсом созданы первые лазеры на рубине. Вскоре в том же году создан первый газоразрядный лазер на смеси гелия и неона, а в 1962 г. — полупроводниковые лазеры [25].

Лазер имеет широкие технологические возможности, к которым относятся: высокая концентрация энергии в пучке (до $1 \cdot 10^8$ Вт/см²); практически безынерционное управление энергетическим потоком, высокая точность фокусирования луча, что обеспечивает минимизацию зоны термического влияния и деформаций, проникновение в труднодоступные места. Важнейшим преимуществом лазерного луча по сравнению с электронным является возможность передачи излучения без потерь на значительные расстояния с помощью пропускающих (на базе линз) или отражающих (на базе параболических зеркал) оптических систем и распределения энергии нагрева по рабочим зонам; бесконтактность обработки; экологическая чистота. Энергия лазерного луча может концентрироваться в точку диаметром около 0,2 мм.

В 1970-х годах для технологических целей разработаны несколько систем лазеров, но наибольшее применение получили лазеры на углекислом газе (СО₂-лазеры) и твердотельные — на алюмоит-

триевом гранате, легированном неодимом (АИГ) (рис. 3).

Первые технологические лазерные установки имели максимальную энергию излучения не выше 2 Дж с длительностью импульса до 8 мс и частотой посылок до 60 имп./мин. Однако лазеры постоянно совершенствуются. К концу 1960-х годов разработаны импульсные квантовые генераторы. В 1974 г. эти лазеры использованы в установках типа «Квант» для сварки и других работ термического характера [26]. В 1972 г. впервые в СССР эксперименты по непрерывной лазерной сварке были проведены сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона и Физического института им. П. М. Лебедева. В 1975 г. в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова была создана промышленная установка на базе СО₂-лазера [27].

Особенно эффективно применение для сварки и родственных технологий СО₂-лазеров, имеющих широкий диапазон мощности и излучения, при этом увеличить их эффективность можно за счет импульсного режима работы. При пайке, как правило, требуется плотность мощности на выходе меньше чем при сварке и резке, что достигается регулированием мощности, и площади пятна, применением линз с очень коротким фокусным расстоянием.

Гибкие световоды позволяют транспортировать лазерный луч к любому месту пайки с минимальными потерями энергии. Установки типа «Квант» с гибким световодом были применены при изготовлении и ремонте изделий из титановых сплавов. Во многих случаях для ремонта необходим только локальный нагрев дефектных участков, что можно выполнить лишь подводом концентрированной энергии. В тех случаях, когда необходим быстрый нагрев значительной площади изделия, применяют дефокусирование пучка или сканирование пучком (рис. 4). В первом случае нагревается узкая полоса материала, во втором случае площадь пятна достигает несколько сот квадратных миллиметров.

В 1970-х годах в ИЭС им. Е. О. Патона (В. П. Гарашук, О. А. Величко, П. Ф. Аврамченко), Институте металлургии им. А. А. Байкова и ряде других организаций разработаны высокоэффективные технологии изготовления элементов электронной техники пайкой лучом лазера. Удалось решить проблемы соединения тонких проволок с тонкими пленками, а также образования омических контактов в кристаллах интегральных схем [28, 29]. В ходе исследований О. В. Якубовичем, В. Е. Матюшковым и другими доказана возможность присоединения «паучка» к шариковым выводам интегральных схем путем пайки за один импульс излучения лазера на установке «Квант-16» [30].

В 1980-х годах лазерная пайка начинает широко применяться в серийном производстве, стальных конструкций, например, при соединении листов кузовов автомобилей, причем припой подается в виде проволоки (рис. 5) [31].

В последующие годы усилилось внимание к проблемам лазерной пайки керамики с металлом. В частности, в МГТУ им. Н. Э. Баумана (Б. А. Ви-

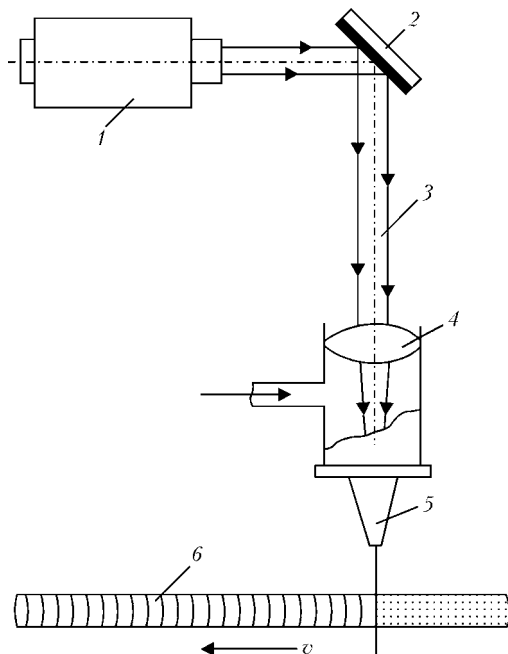


Рис. 3. Схема системы СО₂-лазера для обработки металлов: 1 — источник лазера; 2 — зеркало; 3 — луч лазера; 4 — линза; 5 — сопло; 6 — деталь

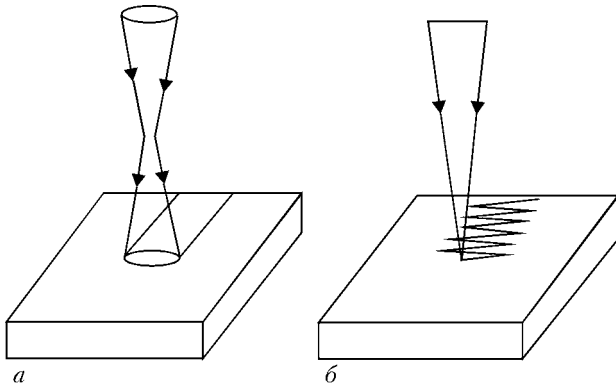


Рис. 4. Схематическое изображение дефокусированного (а) и сканированного (вибрирующего) (б) пучка

ноградов, Д. Л. Харичева и др.) созданы математические модели пайки плоских и конусных охватывающих металлокерамических соединений [32, 33].

В Японии с помощью лазерной пайки решены проблемы соединения жаропрочных сплавов и алюминиевых сплавов с использованием жаропрочных припоев из благородных металлов и алюминиевых припоев. При этом использован диодный лазер, который обеспечивал подавление эрозии основного металла, очень точное локальное управление [34]. В США и Канаде лазерная пайка успешно применяется при ремонте лопаток гидротурбинных двигателей [35]. Есть сообщения об эффективном применении лазерной пайки в электронике (Германия) [36].

В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона продолжаются работы по шовной лазерной пайке оцинкованной стали (В. Ф. Хорунов, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, И. В. Зволинский, С. В. Максимова, А. В. Бернацкий, А. В. Сиора). Для этого был создан специальный стенд (рис. 6) на базе двухкоординатного манипулятора. В экспериментах использован лазер ЛТ-104, разработанный и изготовленный в ИЭС им. Е. О. Патона [37]. Припой на основе меди выполнен в виде проволоки диаметром 1,2 мм. Стыки листовой оцинкованной стали паяли в зазор (0,6 мм). Получено удовлетворительное формирование верхнего и нижнего валиков усиления, плавный переход металла припоя к цинковому покрытию без нарушения последнего. Скорость пайки — до 2 м/мин.

К числу лучевых источников нагрева для пайки можно причислить кварцевые лампы. В зависимости от технологических условий применяют установки с рефлекторами, линзами световодами, лампами различных типов. Наиболее часто используют лампы инфракрасного нагрева для работы в горизонтальном положении (кварцевые йодные лампы типа НИК-220-1000, КИО-220-2500 и др.) [38–40], мощность которых достигает нескольких киловатт с температурой нагрева свыше 2000 °С. В 1970-х годах пайка кварцевыми лампами в инертном газе успешно применялась для изготовления сотовых панелей из титановых сплавов, разнооб-



Рис. 5. Лазерная пайка кабины автомобиля

разных конструкций из других металлов, а также пластмасс [39].

Особое место для целей сварки и пайки занимает световой луч [40–44]. С середины 1950-х годов для решения ряда проблем научно-технического прогресса (изготовления электронных приборов, выращивания монокристаллов и других) начинают применять нагрев световым лучом. В соответствии с концепцией разработки светолучевого технологического оборудования, сформулированной Г. Д. Никифоровым, в 1968 г. в Московском авиационном технологическом институте им. К. Э. Циолковского спроектирована первая экспериментальная установка для сварки и пайки чистой энергией УСПЛЭ-1-МАТИ (М. И. Опарин). В первой половине 1970-х годов созданы светолучевые установки с мобильными горелками в виде дуговых ксеноновых ламп мощ-

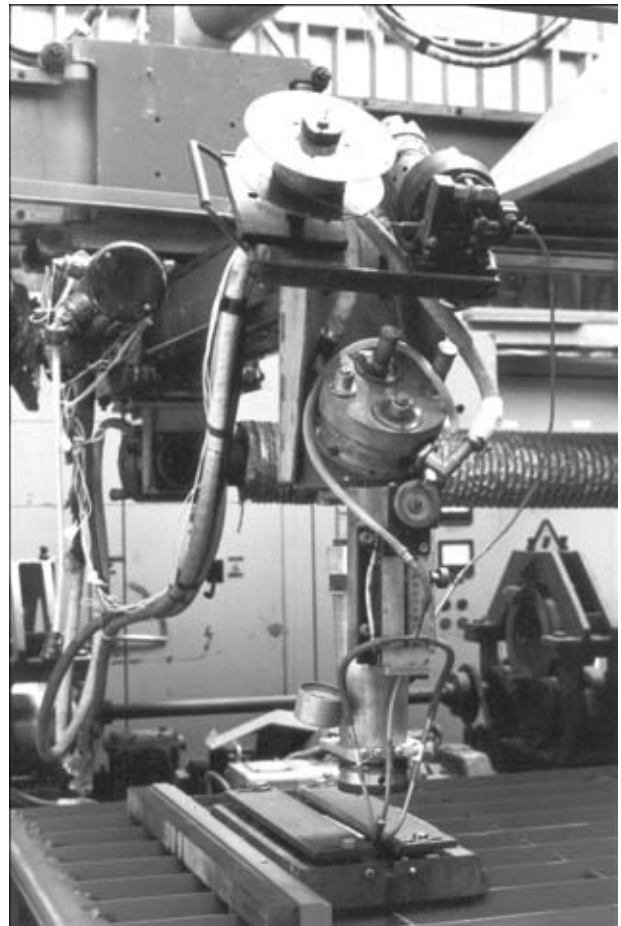


Рис. 6. Стенд для лазерной шовной пайки

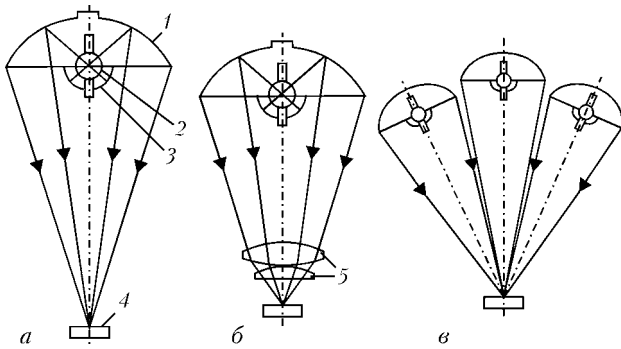


Рис. 7. Оптические схемы экспериментальных установок с моноэллипсоидной (а), моноэллипсоидной с линзовым объективом (б) и полиэллипсоидной (в) для сварки, пайки и термической обработки лучистой энергии: 1 — эллипсоидный отражатель; 2 — дуговая ксеноновая лампа; 3 — контроотражатель; 4 — нагреваемый объект; 5 — мензювый объектив

ностью до 10 кВт, проведены экспериментальные исследования установок с различными фокусирующими системами (рис. 7) [43, 44].

К числу экспериментальных установок принадлежат установка с семью оптическими фокусирующими системами и лампами, малогабаритная установка «Фотон-1» и др. [45]. Широкомасштабными исследованиями определены технологические преимущества: бесконтактный нагрев изделия с подводом энергии через оптически прозрачные камеры в любой газовой среде и любом давлении, нагрев изделия независимо от физических и химических свойств материалы, высокая точность управления параметрами режима [37]. Аналогичные результаты получены в США, Японии и других странах [46].

В ряде случаев именно пайка сфокусированной лучистой энергии позволяет получить высококачественные соединения для изделий электронной техники. На промышленной установке УПСЛ-1 выполнена пайка планарных выводов микросхем на печатные платы и герметизация с помощью луча корпусных деталей в вакууме [47].

В 1980-х годах разработано более мощное светолучевое оборудование. Специальные металлические отражатели и импульсный режим питания позволили увеличить плотность потока до 12 кВт/см²; сфероэллипсоидные фокусирующие системы позволяют получить кольцевой и расщепленный на несколько лучей поток [48].

Особое место среди лучевых источников принадлежит Солнцу — естественному природному источнику тепла, от которого зависит жизнь на Земле. Способ концентрации солнечной энергии с помощью оптических линз применялся с древнейших времен. Так, в храмах Древнего Китая, Древнем Риме и Древней Греции зажигали священный огонь. В начале прошлого столетия была возрождена традиция также зажигать олимпийский огонь от солнечных лучей. В развалинах столицы Ниневии (Месопотамия) были найдены линзы, датируемые в VII в. до н. э. Первые исследования нагрева предметов солнечными лучами описал

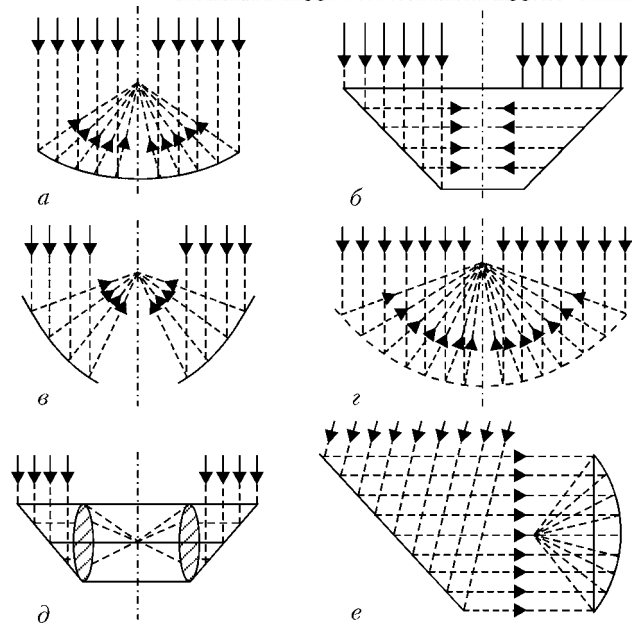


Рис. 8. Схемы гелиоконцентраторов: а — параболоидного (параболоцилиндрического, цилиндрического); б — конического; в — тороидального; г — составного из отдельных плоских зеркал; д — зеркально-линзового; е — с подвижным зеркалом и неподвижным концентратором

древнегреческий ученый Архимед в трактате «О зажигательных стеклах» [49]. Он же изобрел, и, как считают, впервые применил, и второй способ концентрации солнечной энергии отражением от зеркал. Согласно византийскому поэту Цецесу Архимеду удалось сжечь римский флот консула Марцелла, осаждавший Сиракузы, предложив женщинам направлять в одну точку на кораблях солнечные зайчики от их зеркал [50].

Естественно, что энергия Солнца и кажущаяся простота ее концентрации не раз привлекала внимание изобретателей. В конце XIX в. в России, Великобритании, Франции появились сообщения об успешном использовании солнечного тепла в паровых двигателях. Устройства для нагрева даже получили название «инсолятор». Однако эффективность таких устройств была чрезвычайно низкой и практического применения они не имели.

Во второй половине XX в. развивается гелиоэнергетика, занимающаяся проблемами энергетического использования солнечной энергии. Работы ведутся в нескольких направлениях преобразования энергии Солнца в другие виды энергии, удобные для практического использования (в первую очередь тепловую и энергетическую). Основным элементом гелиоустановок для нагрева являются гелиоконцентраторы (рис. 8). Устройства для концентрации лучистой энергии, повышающие на небольшом участке в $10... 10^{10}$ раз плотность энергии солнечной радиации, сконструированы в виде плоских или вогнутых отражателей различной формы.

Солнечные печи, кроме концентраторов, состоят из камеры нагрева, регулятора плотности потока, лучистой энергии и системы управления положением относительно направления освещения. В раз-



Рис. 9. Бизеркальная оптико-энергетическая установка — солнечная печь мощностью 1 МВт Института материаловедения НПО «Физика — Солнце» (пос. Паркент, Ташкентская обл.)

личных странах к концу XX в. созданы печи, пригодные для плавки, сварки, пайки, термической обработки, в которых достигнута температура нагрева 3500... 3800 °С. Крупные солнечные печи мощностью более 1 мВт построены в Фон-Роме — Одейо (Франция) в пос. Паркент (Ташкентская обл., Узбекистан) (рис. 9), в Туркменистане (НПО «Солнце»), в США (Калифорния), в Лас-Салинасе (Чили) и др. О возможностях использования солнечной энергии можно судить по результатам испытаний гелиоустановки в США (г. Альбукерк, штат Нью-Мексико). Солнечные зайчики от 1775 зеркал в 1,5 м каждое, сфокусированные на стальной плите размером 400×300×20 (мм), раскалили ее за 2 мин до температуры 1000 °С. Следует отметить, что основным назначением разрабатываемых печей является нагрев воды для опреснения, получения пара и других целей. Однако известны работы, направленные на использование солнечной энергии для химических технологий и плавления — переплава, сварки, пайки [51, 52]. Наиболее вероятно, что сварка и пайка с помощью солнечной энергии найдет применение при строительстве и ремонте инженерных сооружений в космосе. Технической основой для создания специальных концентраторов могут служить решения, поиск которых ведется при разработке крупногабаритных солнечных отражателей из полимерной металлизированной пленки, разворачиваемых на околоземной орбите для подсветки отдельных участков Земли, и зеркал-концентраторов большого диаметра, солнечных газотурбинных установок [19]. Для создания технологических гелиоустановок можно использовать уже найденные технические решения. Известны несколько прогрессивных конструкций космических оптических систем с увеличенным диаметром металлических зеркал [53]. Е. А. Коршенко, И. М. Ждановым, С. И. Моравецким, С. К. Фомичевым и другими (НТУУ «Киевский политехнический институт») и В. Ф. Лапчинским (ИЭС им. Е. О. Патона) разработана облегченная многослойная конструкция из гофрированных тонколистовых элементов [54]. И хотя, по мнению авторов, такие системы должны формироваться с применением сварки (односторонних точечных соединений), многолетний опыт изготов-

ления подобных решетчатых конструкций (авиационных и ракетных) позволяет утверждать, что и при строительстве оптических систем в космосе наиболее эффективным способом соединения будет пайка [55].

Выводы

1. Благодаря открытиям в области физики высоких энергий, оптики и разработки устройств, излучающих потоки электронов и квантов света, во второй половине XX в. созданы промышленные установки, предназначенные для преобразования кинетической энергии потоков электронов и электромагнитного излучения в тепловую энергию, практически пригодные для целей пайки.

2. Технологические возможности электронно-лучевых и оптических установок: безынерционность, высокая концентрация энергии, точность позиционирования — позволяют эффективно решать проблемы изготовления сложных узлов и конструкций от микроэлектронных элементов до крупногабаритных инженерных сооружений в космосе из всех конструкционных металлических сплавов, керамики и других материалов.

1. Петунин И. Е., Екатова А. С., Маркова И. Ю. Металловедение пайки. — М.: Металлургия, 1976. — 263 с.
2. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Вопросы теории и технологии пайки. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. — 247 с.
3. Россошинский А. А., Табелев В. Д., Кислицын В. М. Микросварка давлением. — Киев: Техника, 1971. — 152 с.
4. Справочник по пайке / Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 397 с.
5. Развитие пайки в XX-м веке / В. П. Фролов, И. Ю. Маркова, В. К. Ерошев и др. // Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции. — М.: ЦРДЗ, 2001. — С. 3–11.
6. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов // Сварка в СССР. — М.: Наука, 1981. — Т. 1. — С. 438–452.
7. Шиллер В., Гайзик У., Паицер З. Электронно-лучевая технология / Пер. с нем. — М.: Энергия, 1980. — 495 с.
8. Wyman W. L. High-vacuum electron-beam fusion welding // Welding J. — 1958. — № 2. — P. 49–53.
9. Stohr J. A., Briola J. Vacuum welding of metals // Welding and Metal Fabric. — 1958. — 10. — P. 366–370.
10. Ольшанский Н. А. Метод сварки электронным лучом в вакууме // Автомат. сварка. — 1959. — № 8. — С. 3–11.
11. Некоторые технологические особенности сварки электронным лучом в вакууме / Б. А. Мовчан, Д. М. Рабкин, С. М. Гуревич, С. Д. Загрбенюк // Там же. — 1959. — № 8. — С. 32–33.
12. Влияние некоторых технологических параметров на процесс сварки-пайки / В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский, В. С. Несмих, Н. Н. Синица // Там же. — 1968. — № 11. — С. 22–25.
13. Кабанов А. Н., Кафаров А. А., Михайловский Г. А. Эксплуатационные характеристики установки ЭЛУРО // Там же. — 1967. — № 3. — С. 72–73.
14. Ильин В. В., Клейков А. Г. Стабилизированный источник ускоряющего напряжения установки ЭЛУРО // Там же. — С. 75–76.
15. Кабанов А. Н., Золотов Л. А. Применение установки ЭЛУРО для микросварки и пайки // Там же. — С. 74–75.
16. Электронно-лучевая пайка узла безыгольного инжектора / В. М. Плетнев, Ф. Н. Рыжков, М. Л. Дроздов, Н. Г. Стегнин // Свароч. пр-во. — 1971. — № 4. — С. 49–50.
17. Технология низкотемпературной вакуумной пайки узлов решетчатых ферменных конструкций из алюминиевых сплавов / В. Ф. Хорунов, В. Ф. Лапчинский, В. И. Швец, В. Ф. Шулым // Автомат. сварка. — 1993. — № 2. — С. 52–53.
18. Ткаченко Г. Г., Радзиевский В. Н., Гарицнов Ю. Ф. Автотермическая пайка рабочих колес центробежных компрес-

- соров из стали О7Х16Н6 // Пайка. — Тольятти: Тольят. политехн. ин-т, 2000. — С. 44–48.
19. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 181 с.
 20. Особенности формирования паяных соединений тонкостенных конструкций в космосе / В. Ф. Хорунов, В. И. Швец, А. Р. Булацев, С. С. Гавриш // Автомат. сварка. — 1999. — № 10. — С. 31–38.
 21. Технология ремонта трубопроводов с использованием электроннолучевой сварки и пайки применительно к условиям космоса / Е. А. Аснис, С. П. Заболотин, В. Ф. Лапчинский, Д. П. Новикова // Там же. — 1997. — № 8. — С. 50–53.
 22. Ферменные конструкции в орбитальных комплексах / Б. Е. Патон, А. Р. Булацев, Е. С. Михайловская и др. // Там же. — 1998. — № 11. — С. 5–10.
 23. Ласло Т. С. Оптические высокотемпературные печи. — М.: Мир, 1968. — 212 с.
 24. Бори М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. — М.: Наука, 1973. — 719 с.
 25. Клаудер Дж. Р., Сударшан Э. Основы квантовой оптики / Пер. с англ. под ред. С. А. Ахманова. — М.: Мир, 1970. — 425 с.
 26. Баранов М. С., Кондратьев В. А., Углов А. А. Кинетика образования соединения проволоки при сварке лучом импульсного лазера // Физика и химия обработ. материалов. — 1972. — № 5. — С. 11–14.
 27. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.
 28. Аврамченко П. Ф., Величко О. А., Моравский В. Э. Импульсная лазерная пайка проводников с пленками в микроприборостроении // Автомат. сварка. — 1978. — № 5. — С. 24–26.
 29. Соединение элементов интегральных схем с помощью лазера. — Новости науки и техники: Информ. сообщение / ВИНТИ. — 1975. — № 14. — С. 15–16.
 30. Пайка лучом лазера изделий электронной техники / О. В. Якубович, В. Е. Матюшков и др. // Там же. — 1975. — № 4. — С. 57–59.
 31. Husner J., Olainck S. Laser brazing in automobile production // Thyssen Krupp Techforum. — 2003. — № 12. — P. 60–63.
 32. Виноградов Б. А., Харичева Д. Л., Швайка Д. С. Моделирование тепловых процессов при лазерной пайке керамики с металлом // Пробл. машиностроения и надежности машин. — 2001. — № 4. — С. 71–75.
 33. Определение характерных тепловых зон при лазерной пайке металла с керамикой / Б. А. Виноградов, Д. Л. Харичева, В. А. Степочкин, Ю. А. Петраченко // Свароч. пр-во. — 2004. — № 8. — С. 23–26.
 34. Сауда К., Нисимото К. Способ высокотемпературной пайки диодным лазером // Технология сварки. — 2003. — № 51, № 6. — С. 92–98.
 35. Додд Э., Билах Я. Ремонт лопаток лазером технология будущего // Сварщик. — 2004. — № 3. — С. 34–35.
 36. Azdasht G., Zakel E., Reiche H. Implementation of low power diode laser for soldering by fibre push connection method // Soldering and Surface Mount Technology. — 1996. — № 22, Fabr. — P. 51–54.
 37. Технологический СО₂-лазер ЛТ-104 мощностью 10 кВт / В. П. Гаращук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 36–39.
 38. Электронечи с инфракрасным нагревом ОКБ-1152 и ОКБ-1153 // Электротермия. — 1965. — Вып. 43. — С. 3–4.
 39. Хорунов В. Ф., Кужель А. В., Малевский Ю. Б. Изготовление паяных слоистых конструкций // Автомат. сварка. — 1974. — № 11. — С. 53–56.
 40. Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А. Сварка и пайка световым лучом: Учебн. пособ. — М.: Машиностроение, 1979. — 40 с.
 41. Использование энергии светового луча в технологических целях / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин и др. // Сварочн. пр-во. — 1993. — № 4. — С. 12–14.
 42. Хорунов В. Ф., Шаль Дзиго. Сварка и пайка различных материалов с использованием светового луча дуговых ксеноновых ламп (Обзор литературы) // Автомат. сварка. — 1995. — № 5. — С. 48–52.
 43. Использование сфокусированной лучистой энергии мощных ксеноновых ламп для сварки и пайки металлов / Никифоров Г. Д., Дьяченко В. В., Опарин М. И., Лопатина Г. Г. // Сварочн. пр-во. — 1969. — № 9. — С. 1–3.
 44. Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А. Использование лучистого нагрева для сварки, пайки и термической обработки // Там же. — 1974. — № 12. — С. 18–21.
 45. Миронов Л. Г., Раваев Г. П., Петухов В. Ф. Опыт применения сфокусированной лучистой энергии дуговых ксеноновых ламп для пайки изделий // Новые достижения в области пайки. — Киев: ИЭС, 1981. — С. 116–120.
 46. Takagi M., Yamaji T. New soldering process using light beam technology // Soldering and Surface Mount Technology. — 1995. — № 20, Maj. — P. 13–20.
 47. Фролов В. А. Конструкторско-технологические особенности разработки сварных конструкций с применением светолучевой сварки // Свароч. пр-во. — 1998. — № 3. — С. 16–20.
 48. Разработка и развитие технологий сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Прошин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // Технология машиностроения. — 2003. — № 5. — С. 28–29.
 49. Архимед. Сочинения. — М.: Физматгиз, 1962. — 639 с.
 50. Веселовский И. Н. Архимед. — М.: Учпедгиз, 1957. — 111 с.
 51. Оптические инфракрасные телескопы 1990-х гг. — М.: Мир, 1983. — 296 с.
 52. А. с. СССР 350614, МПК В23К 27/00. Рефлектор / А. Н. Корниенко. — Оpubл. 13.09.1972, Бюл. 27.
 53. Семенов Ю. П. Космические технологии на рубеже веков: итоги и перспективы // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 23–31.
 54. А. с. 1684091 СССР, МПК 5 В32В 3/12. Пакет для изготовления многослойной конструкции / И. М. Жданов, В. В. Конончук, С. К. Фомичев и др. — Оpubл. 15.10.91, Бюл. № 38.
 55. Решетчатые крылья / С. М. Белоцерковский, Л. А. Одновол, Ю. З. Сафин и др. / Под ред. С. М. Белоцерковского. — М.: Машиностроение, 1985. — 320 с.

The paper deals with the features of development of the design and application of technologies using the electron beam, laser, quartz lamps, as well as solar energy. It is shown that the inertialess heat sources enable controlling the heat input in a broad range, which allows considerable widening of the scope of brazed materials. Intensive development of the technique of brazing using concentrated heat sources is noted.

Поступила в редакцию 27.12.2004



МЕТОД РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРАВЛЯЮЩИХ ГРАФОВ И ЯЗЫКОВЫХ СРЕДСТВ ISaGRAF ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СВАРОЧНЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Ф. Н. КИСИЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, В. В. ДОЛИНЕНКО, канд. техн. наук, Д. Д. ТОПЧЕВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен метод разработки программного обеспечения интеллектуальных сварочных контроллеров с использованием управляющих графов состояний и языка SFC пакета ISaGRAF. Рассмотрен пример синтеза дочерней программы «Поджиг дуги» для контроллера источника питания дуги АСУТП сварки ТИГ.

Ключевые слова: дуговая сварка, автоматическое управление, управляющие графы, программное обеспечение

Данная работа посвящена проблеме создания объектно-ориентированных систем автоматического управления дуговой сваркой [1]. Разработка программного обеспечения для интеллектуальных контроллеров сварочного оборудования в некоторых случаях может вызывать затруднение. С одной стороны к ним предъявляются требования невысокой стоимости, в то же время они должны реализовывать принятые в автоматизированной системе протоколы обмена данными и поддерживать в реальном масштабе времени реализацию управляющих графов состояний самого нижнего уровня управляющей программы. Интересным решением может быть применение программируемого логического контроллера (ПЛК) «Smart-I/O» (фирма «PEP», Германия) для создания интеллектуальных сварочных контроллеров. В отличие от традиционных ПЛК «Smart-I/O» способен выполнять программы, написанные как с использованием известных языков программирования ANSI-C и C++, так и специализированного пакета ISaGRAF [2]. Преимуществами последнего является следующее: используются стандартные языки программирования IEC1131-3; графический интерфейс разработки; доступность в освоении и удобство использования; встроенные средства программирования промышленных сетей; удобные и эффективные средства отладки.

В соответствии со стандартом IEC1131-3 в распоряжении разработчика имеются пять языковых средств: язык последовательных функциональных схем (SFC); функциональных блок-диаграмм (FBD); релейных диаграмм (LD); структурированного текста (ST) и инструкций (IL).

В ИЭС им. Е. О. Патона ведутся работы по созданию методики автоматизированного проектирования объектно-ориентированных АСУТП сварки, в том числе контроллеров сва-

рочного оборудования. Проведенные исследования по разработке формального подхода для синтеза управляющих программ на языке ISaGRAF позволили сформулировать метод разработки программ для интеллектуальных контроллеров сварочного оборудования. Рассмотрим в качестве примера программирование управляющего графа для функции «Поджиг дуги» сварки ТИГ изделий из алюминиевых сплавов (рисунк).

При обозначении ребер графа приняты следующие соглашения:

$$U_{ab}?:\{V_{ab}\}, \quad (1)$$

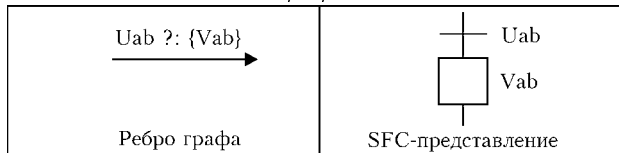
где U_{ab} — условие, записанное в виде булевого выражения; V_{ab} — оператор, который выполняется при истинном значении условия U_{ab} ; a, b — номера вершин графа, между которыми имеется данное ребро.

Назначение модуля (дочернего процесса) chPodjig состоит в том, чтобы после получения команды от контроллера верхнего уровня «Запуск сварки» выполнить следующие действия: поднять сварочную горелку на некоторое расстояние над поверхностью изделия; включить источник питания дуги; увеличить сварочные токи до требуемых значений; опустить сварочную горелку до уровня поверхности изделия; передать управление следующему программному модулю.

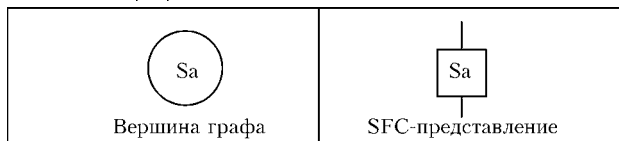
Структура управляющей программы контроллера сварочного оборудования разработана на языке FBD, дочерние программы — на языках SFC и ST.

Разработанный нами формальный метод преобразования ориентированного управляющего графа состояний в блок-схему SFC-программы представляет собой систему формальных правил, которые позволяют получить SFC-программу, поведение которой с точки зрения задачи управления соответствует исходному управляющему графу.

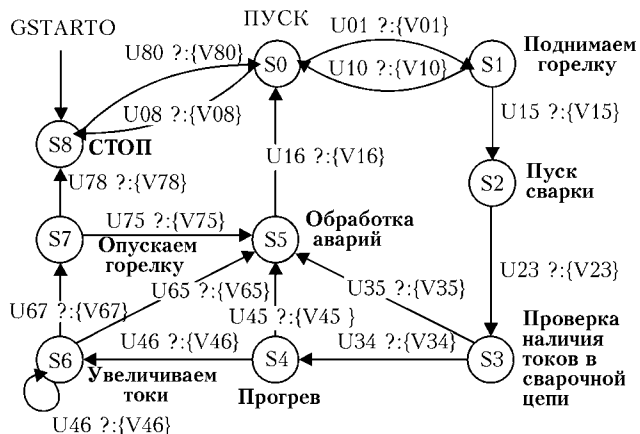
Правило 1. Каждое ребро ориентированного графа заменяется парой объектов «переход-шаг» SFC-программы. При этом объект «переход» реализует условие U_{ab} , а «шаг» — действие V_{ab} для данного ребра.



Правило 2. Каждая вершина графа заменяется блоком «шаг» SFC-программы.



Шаг не должен иметь никаких внутренних операторов, однако в том случае, если в данной вершине имеется ребро-петля, поведение «шага» описывается «non-stored» действием. В соответствии с терминологией языка SFC-программы «non-



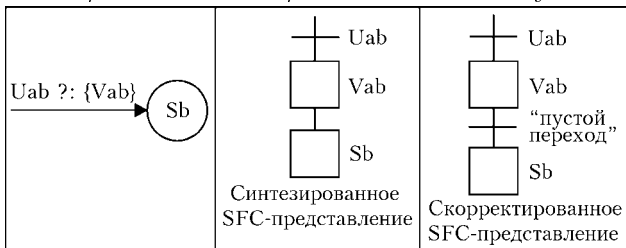
Управляющий граф дочерней программы «Поджиг дуги»

© Ф. Н. Кисилевский, В. В. Долинченко, Д. Д. Топчев, 2005

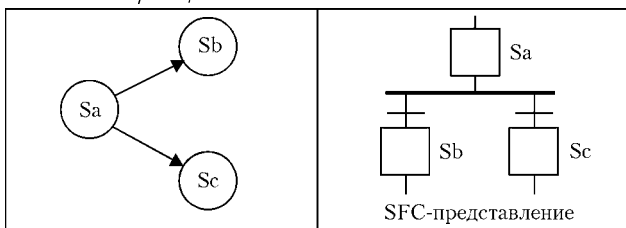


stored» действием является блок с операторами, который выполняется многократно в каждом такте работы SFC-программы, в отличие от «pulse» действия, которое выполняется только один раз при достижении информационной «фишки» данного «шага» (информационная «фишка» отмечает активный «шаг»).

Правило 3. Следует из правила создания SFC-программы: между двумя «шагами» SFC-программы необходимо наличие объекта «переход». Если два последовательных «шага» не имеют объекта «переход», то его необходимо добавить, причем содержимое такого «перехода» должно быть пустым.

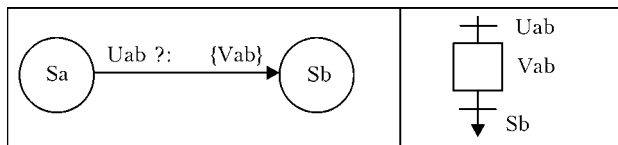


Правило 4. Если вершине графа смежны несколько ребер, ориентированных к другим вершинам, то применяется SFC-объект «дивергенция».



A new method is proposed to develop software of intellectual welding controllers, using control graphs of the conditions and SFC language of IsaGRAF package. An example is considered of synthesis of a child program «Arc ignition» for the arc power controller of TIG-welding CAM system.

Правило 5. В связи с тем, что SFC-программа организована в виде вертикальных цепочек объектов, ребра графов допускается разрывать. При этом используется пара объектов «переход» с использованием «безусловный переход».



Организация реального масштаба времени в поведении SFC-программы достигается следующим образом. Обнуляется переменная, которая ранее была объявлена с типом «Timer», в коде объекта «шаг», например:

T1 = t#0 мс.

В следующий за этим шагом «переход» добавляется неравенство, например:

T1 > t#1 с.

В данном случае будет выполнена временная задержка длительностью 1 с.

1. Киселевский Ф. Н., Долиненко В. В. Объектно-ориентированное программирование систем управления технологическим процессом сварки // Автомат. сварка. — 2001. — № 6. — С. 43–49.
2. IsaGRAF IEC1131-3 Version 3.00 // User guide. C.J. International. — 2000. — P. 183.

Поступила в редакцию 11.11.2004

НОВОСТИ

В SVL МЕКЛЕНБУРГ-ВОРПОМЕРН РАБОТАЕТ ПЕРВАЯ 10 кВт ВОЛОКОННО-ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА

29–30 июля 2004 г. Центр лазерных технологий в Ростке получил в свое пользование первый в мире иттербиевый (Yb) волоконный лазер мощностью 10 кВт.

Пользователь этого лазера (SVL M-V GmbH) и производитель (IPG GmbH) провели многочисленные измерения на нем при запуске в эксплуатацию. Установлено, что его КПД (от сети) примерно 25 %, а параметр пучка около 12 мм-мрад, что является новыми стандартами в лазерной технике.



Эти технические характеристики, а также малые габаритные размеры лазера (ширина 1,5 м, высота 1,5 м, глубина 0,8 м) и простое электрическое подключение с помощью обычного стандартного (63 А) штекера отличают его от большинства используемых в настоящее время твердотельных или CO₂-лазеров для обработки материалов.

Одновременно с этим введено в эксплуатацию современное технологическое оборудование для сварки, резки и поверхностной обработки материалов.

TRANSPOCKET 1200

Классический инвертор уже стал достоянием прошлого. Новый уровень требований к установкам для ручной дуговой сварки плавящимся электродом — это *резонирующий интеллект*.

Концепция *резонирующего интеллекта* компанией «Фроннус» была разработана специально для ручной дуговой сварки покрытыми электродами. С помощью резонирующего интеллекта дуга оказывает непосредственное воздействие на мощность. Каждое возмущение, влияющее на характеристики дуги, вызывает мгновенную реакцию источника. Это позволяет получить дугу с оптимальными энергетическими параметрами на всем протяжении процесса, что, в свою очередь, обеспечивает превосходные сварочные технологические свойства.

TransPocket 1200 обеспечивает отличную сварку всеми обычно используемыми электродами диаметром до 3,25 мм. Его удобство для пользования, прочная конструкция и высокие рабочие характеристики являются большими преимуществами так же, как и его масса, равная 3,7 кг.

Преимущества применения TransPocket 1200:

- плавнорегулируемая мощность сварки;
- функция горячего старта;



- функция предотвращения прилипания;
- энергосберегающая инверторная технология;
- вентилятор, управляемый термостатом;
- устройство для контроля напряжения сети;
- защита от превышения температуры;
- ремень для переноски;
- совместимость с генератором;
- пылевой фильтр (дополнительно).

Технические данные

| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Напряжение сети +/-15 %, В | 230 при 50... 60 Гц |
| Диапазон сварочного тока, А | 10... 120 |
| Ток сварки (ПВ = 15%), А | 120 |
| Ток сварки (ПВ = 100%), А | 40 |
| Габариты, мм | 265X110X200 |

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИВАРКИ ГИБКИХ УПОРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Применение сталежелезобетонных конструкций в строительстве позволяет объединить положительные свойства стали и бетона. Это значит, что стальной каркас конструкции соединяется с бетонными частями так, что обеспечивает эффект совместной работы. Стальные элементы балки принимают растягивающие усилия, а бетонные — сжимающие усилия, а также обеспечивают защиту от огня. Такие конструкции применяются при строительстве мостов, высотных промышленных и административных сооружений. Однако применение таких конструкций в Украине сдерживается отсутствием технологий и оборудования для присоединения закладных элементов для соединения стальных балок с бетоном. Наиболее прогрессивный способ соединения — это применение холодно- или горячештампованных упоров, которые должны привариваться на стальную балку и выдерживать сдвигающие усилия и предотвращать отрыв бетонной плиты от стальной балки под нагрузением.

Внедрение этой технологии дает большие преимущества при строительстве:

- эффективное и экономичное производство в большом количестве и широкий диапазон размеров конструкций;
- надежность и безопасность при статических и динамических нагрузениях;
- механическое соединение стали и бетона, предупреждение отрыва бетонной плиты;
- высокая пластичность, значительное повышение несущей способности;
- анкерка стальных частей в бетоне, который выдерживает разные направления приложения нагрузки, отсутствие растрескивания;
- прочные сварные стыки гибких упоров при незначительной деформации металла;
- оборудование для сварки упоров с электронным управлением и контролем обеспечивает контролируемое качество сварки.

В ОКБ ИЭС им. Патона совместно с ЗАО «Укрепцетерм» разработаны и изготавливаются установки для приварки шпилек. Данное оборудование обеспечивает сварку шпилек в среде защитных газов, под флюсом, с защитными керамическими кольцами, а также без защиты и может применяться для ремонта и изготовления шпильчатых экранов в стационарных и монтажных условиях.

Первая установка для сварки гибких упоров была разработана и изготовлена по заказу Дирекции строительства до-

ОТКРЫТИЕ НОВОГО ЦЕНТРА ЛАЗЕРНЫХ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Недавно в г. Велс (Австрия) был торжественно открыт Центр лазерных гибридных технологий. В центре, имеющем две полностью оснащенные лазерные гибридные установки, начиная с 2005 г. будут сосредоточены все эксперименты по сварке, демонстрации и учебные занятия, связанные с лазерными гибридными технологиями.

Лазерная гибридная сварка объединяет лазерную и дуговую сварку плавящимся электродом в защитных газах в один общий сварочный процесс. Технология обеспечивает повышенную стабильность процесса и более высокие скорости сварки, а также хорошее сплавление металла шва.



Лазерные гибридные установки фирмы «Фрониус» нашли применение во всем мире. Наиболее эффективно они используются в автомобильной промышленности, а также в исследовательских институтах и судостроении.

рожно-транспортных сооружений г. Киева коммунальной корпорации «Киевавтодор» для выполнения сварки гибких упоров при строительстве Подольско-Воскресенского мостового перехода в г. Киеве. С августа 2004 г. установка передана в АО «Мостобуд» и используется для сварки гибких упоров в местах соединения пролетных балок эстакады Подольско-Воскресенского мостового перехода. В настоящее время сварено более 10 тысяч гибких упоров диаметром 22 мм и длиной 250 мм.

Установка обеспечивает приварки шпилек из низкоуглеродистой и нержавеющей стали диаметром от 10 до 24 мм дугой с использованием предохранительных колец и газовой защиты и короткоцикловую приварку без газовой защиты.

Электрическая схема установки обеспечивает выбор цикла сварки и плавную регулировку сварочного тока на жестких и падающих характеристиках.

Основные технические параметры установки:

| | |
|--|------------------------------|
| Напряжение сети, В 380 | (не менее 120 кВт) при 50 Гц |
| Напряжение холостого хода, В, не более | 85 |
| ПН, % | до 10 |
| Время горения дуги, мс | 100... 3000 |
| Сварочный ток, А | 300... 2500 |
| КПД, %, не более | 83 |
| Мощность, кВт-А | 120 |
| Габаритные размеры, мм, не более | |
| длина | 1150 |
| ширина | 850 |
| высота | 1200 |
| масса, кг, не более | 700 |

Индикация сварочного тока и напряжения цифровая. Сварочный пистолет имеет электромагнитный привод и пневматическим регулятором осадки для обеспечения отрыва шпильки





от конструкции, возбуждения дуги и поддержания постоянной высоты отрыва во время горения дуги. Для подключения пистолета к установке применяются кабель КОГ-35 общим сечением 105 мм^2 длиной до 20 м. Сварочный пистолет позволяет обеспечить различные скорости осадки шипа в сварочную ванну для получения оптимального качества сварки. Один источник питания может обеспечить работу от 1 до 4 пистолетов.

Приварка шпилек относится к способам сварки плавлением, который заключается в быстром (около 1 с) соединении болтов, штифтов, стержней и т. п. диаметром 3...25 мм с основным металлом на больших токах от 200 до 2500 А, значение которых выбирается в соответствии с диаметром шпильки. При осуществлении этого способа шпилька, контактирующая с основным металлом, поднимается, зажигается дуга, в течение определенного времени пропускается сварочный ток и происходит подплавление основного металла и шпильки. После этого шпилька

быстро вводится в жидкую ванну на основном металле, придавливается и одновременно с этим отключается сварочный ток. Расплавленный металл на шпильке и основном металле образуют единую ванну, после затвердевания которой процесс приварки завершается. Следует отметить, что получение качественных соединений не вызывает никаких трудностей, причем с высокой воспроизводимостью результатов. Режим приварки в основном зависит от диаметра (площади сечения), т. е. чем больше диаметр, тем выше ток и продолжительнее время. Отличительной особенностью приварки шпилек является возможность осуществлять сварку на больших токах в течение короткого периода времени, что напрямую связано с незначительными сварочными деформациями.

Материалы раздела «Новости» подготовлены редакцией журнала «Автоматическая сварка»

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина (г. Москва)

А. В. Сидоренко (РГУНИГ им. И. М. Губкина) 12 октября 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Особенности ремонта элементной оборудованности установок для очистки газа от кислых компонентов»

Анализ условий эксплуатации установок для очистки природного газа от кислых компонентов показал, что основными причинами отказов оборудования являются общая неравномерная и язвенная коррозия металла.

Показано, что использование высоколегированных аустенитных материалов для наплавки на углеродистые стали приводит к существенной макронеоднородности поверхности и, как следствие этого, к ее локальному поражению; возникновение активного гальванического элемента между отремонтированной и неотремонтированной поверхностями приводит к разрушению участка сплавления с основным металлом.

Определено, что в средах, содержащих одновременно пассиваторы и активаторы, даже небольшая электрохимическая гетерогенность приводит к активному язвенному поражению поверхности. Поскольку такая гетерогенность возникает в результате перемешивания при наплавке разнородных основного и присадочного металлов, для соединений, работающих в указанных средах, рационально использовать наплавочные материалы, близкие по химическому составу к основному металлу.

Установлено, что при сопоставимом состоянии неметаллических включений бейнитная составляющая структуры несмотря на высокую термодинамическую неустойчивость обеспечивает повышение стойкости к общей и локальной коррозии за счет более высокой гомогенности. Определен рациональный структурный состав наплавленного металла, состоящий преимущественно из бейнита (не менее 80 %).

Показана возможность применения обобщенной методики Н. Н. Рыкалина для определения основных геометрических

параметров зоны наплавки, температурно-временных условий формирования наплавленного металла и определения режимов технологических процессов аргонодуговой и плазменно-дуговой наплавки. Расчетные результаты подтверждены экспериментально.

Установлена область рационального применения методов аргонодуговой и плазменно-дуговой наплавки. Если толщина восстанавливаемого слоя металла не превышает 2,0...2,5 мм, а необходимая скорость охлаждения в интервале диффузионного превращения аустенита более $40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, возможно применение плазменно-дуговой наплавки. При увеличении толщины наплавленного слоя и соблюдения значений требуемых скоростей охлаждения менее $40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ рационально применение электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде защитных газов.

Разработана технология восстановления поверхности оборудования методом механизированной электродуговой наплавки плавящимся электродом в смеси газов (80 % аргона и 20 % CO_2), обеспечивающая получение в наплавленном слое структуры, содержащей не менее 80 % бейнитной составляющей, стойкой к коррозионному воздействию рабочей среды установок для очистки природного газа от кислых компонентов.

Опытно-промышленными испытаниями доказана правомерность применения разработанной технологии наплавки углеродистых материалов для восстановления элементов оборудования установок для очистки газа от кислых компонентов. При этом во всех случаях наплавленный металл имеет механические характеристики, не ниже соответствующих показателей основного металла, и высокую стойкость к общей неравномерной и язвенной коррозии.

С помощью компьютерного анализа показана возможность обеспечения рационального структурного состава и необходимого сопротивления наплавленного металла воздействию коррозионно-активной среды для целого ряда углеродистых наплавочных материалов.



Созданная по результатам работы технологическая инструкция по восстановлению внутренней поверхности оборудования установки для очистки газа от кислых компонентов типа У172 согласована с ВНИИГАЗом и рекомендована к внедрению во Астраханском газоперерабатывающем заводе.

Белорусско-российский университет (г. Могилев, Республика Беларусь)

Д. И. Якубович (Белорусско-российский университет) 16 декабря 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение качества сварных соединений из чувствительных к термическому циклу тонколистовых сталей перераспределением теплового потока источника нагрева»

В диссертационной работе проанализировано влияние перераспределения тепловложения в изделие на процесс перекрытия зазоров и смещения кромок. Для сталей, чувствительных к термическому циклу сварки, выявлены дополнительные возможности регулирования скорости охлаждения ЗТВ, предотвращения образования мартенсита и сопутствующих холодных трещин за счет перераспределения теплового потока при колебаниях электрода.

Исследовано влияние смещения кромок соединяемых деталей на процесс сварки и установлены максимально допустимые

смещения и зазоры между кромками стыковых соединений металла малой толщины (0,1... 2,0 мм). Показана эффективность использования поперечных колебаний электрода для повышения качества формирования сварного шва и предотвращения образования прожогов.

Показана целесообразность использования более концентрированного источника энергии для ограничения размеров зоны разупрочнения предварительно наклепанной стали в температурном интервале 1500... 400 °С и уменьшения времени роста зерна вблизи шва до 2... 5 с.

Раскрыт механизм образования холодных трещин в сталях, чувствительных к термическому циклу сварки, предусматривающий начало разрушения при взаимодействии водородных атмосфер с перемещающимися дислокациями. Разработаны методы повышения технологической прочности за счет оптимизации окислительного потенциала защитной среды.

Разработана технология роботизированной сварки стали толщиной 1 мм и найдены оптимальные режимы, позволяющие получать качественное сварное соединение при силе сварочного тока 60... 80 А, напряжении 17... 20 В, амплитуде 4 мм и частоте 3 Гц. Результаты исследований сварки стыковых соединений толщиной 1,2 мм в защитных газах с колебаниями электрода внедрены в производство.

УДК 621.79(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Соединение листов металлической фольги и сотовой элемент из листов металлической фольги, отличающееся тем, что листы имеют толщину менее 0,04 мм, а отношение ML/DF массы ML припоя, находящегося в указанном клиновидном промежутке, к толщине DF листа металлической фольги составляет 16... 8 г/м. Патент РФ 2234399. Л. Вирес, Ф. Курт, Х. Шлотманн (Эмитек гезельшафт фюр эмиссионтехнологи Мбх, Германия) [23].

Способ изготовления металлического сотового элемента, заключающийся в том, что формируют сотовый элемент путем набора в пакет и/или скручивания в рулон хром- и алюминийсодержащих стальных листов толщиной 35 мкм или менее, по меньшей мере часть которых является структурированными или профилированными стальными листами, с образованием благодаря этому в сотовом элементе проточных для текучей среды каналов, при этом используют стальные листы, покрытые нанесенным на них при их холодной прокатке прокатным маслом. Приведены и другие известные и отличительные признаки. Патент РФ 2235005. Ф. Курт, А. Бергманн, Х. Шлотманн и др. (То же) [24].

Способ подачи проволоки, отличающийся тем, что перед вводом проволоки в рабочую канавку ее изгибают под углом, по меньшей мере, равном $0,5^\circ$ по отношению к касательной окружности в точке входа проволоки в рабочую канавку между упомянутой касательной и осью проволоки, и с усилием вдавливают проволоку в рабочую канавку, сопряжение проволоки с рабочей канавкой поддерживают на участке длиной, по меньшей мере, равной одному диаметру проволоки и, в большей мере, равной длине рабочей канавки, а при правке проволоки путем обратного изгиба ее изгибают под углом, по меньшей мере, равном $0,5^\circ$ по отношению к касательной к окружности в точке выхода проволоки из рабочей канавки между упомянутой касательной осью проволоки. Патент РФ 2235006. А. В. Иванников, И. В. Суздаев, Я. О. Шапиро (ОАО «Завод Электрик») [24].

Припой на никелевой основе, отличающийся тем, что он дополнительно содержит кобальт и ниобий, при следующем содержании компонентов, мас. %: 17,0... 22,0 хрома; 1,0... 1,6 бора; 4,8... 6,9 кремния; 4,0... 7,0 марганца; 5,0... 10,0 кобальта;

0,7... 1,8 ниобия; остальное никель. Патент РФ 2235007. В. С. Рыльников, А. И. Сидоров, А. Ф. Черкасов и др. (ФГУП ВИАМ) [24].

Припой на основе титана, отличающийся тем, что он дополнительно содержит гафний при следующем соотношении компонентов, мас. %: 19... 26 циркония; 11... 18 никеля; 13... 20 меди; 0,1... 0,3 гафния; остальное титана. Патент РФ 2235008. Е. Н. Катлов, В. И. Лукин, В. С. Рыльников и др. (То же) [24].

Способ односторонней контактной точечной сварки, отличающийся тем, что со стороны верхней детали подводят индуктор, подключенный к источнику переменного ЭДС, одновременно пропускают переменный ток по индуктору и свариваемым деталям в одном направлении с разностью фаз, равной нулю. Патент РФ 2235626. А. И. Демченко, Ю. Г. Новосельцев [25].

Способ получения композиционного материала путем сварки взрывом плакирующей пластины к расположенной с зазором под углом к ней плакируемой, отличающийся тем, что подкладку выполняют композиционной, состоящей по крайней мере из трех слоев, причем слой, прилегающий к поверхности плакирующей пластины, выполняют из эластичного материала толщиной 0,08... 0,16 калибра ствола метательной установки, средний слой — из неметаллического материала плотностью не более $1,0 \text{ г/см}^3$ и толщиной 0,2... 0,3 калибра ствола метательной установки и верхний — из стали толщиной 0,01... 0,02 калибра ствола метательной установки. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2235626. Е. В. Попов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, С. П. Писарев (Волгоградский ГТУ) [25].

Способ изготовления сварных изделий из низкоуглеродистых, нелегированных и малолегированных сталей, отличающийся тем, что охлаждение сварного соединения непосредственно после сварки на воздухе проводят до температуры в интервале от (A_{c1+23}) до (A_{c1-75}) °С, последующий нагрев осуществляют по крайней мере сварного соединения на 100... 200 °С, а окончательное охлаждение производят на воздухе. Патент РФ 2235628. И. В. Зимин, В. Н. Иванов, С. Г. Гуревич, Г. В. Будкин (ФГУП ВНИИТвч им. В. П. Вологодина) [25].

Способ композиционной пайки металлов с полупроводниками или кварцевым стеклом или керамиками, отличающийся тем,

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене РФ «Изобретения. Полезные модели за 2004 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня)».



что готовое к пайке соединение размещают в магнитном поле из условия увеличения капиллярной силы, действующей на легкоплавкую компоненту, за счет получения магнитной силы, выталкивающей ее из ферромагнитной матрицы, при этом пайку производят при температуре ниже магнитного превращения твердофазной матрицы. Патент РФ 2236331. А. А. Ахчубеков, В. З. Ковчуков, М. Х. Понезев и др. (Кабардино-Балкарский ГТУ им. Х. М. Бертекова) [25].

Способ сборки тонкостенных деталей под пайку в расплаве солей, отличающийся тем, что предварительно выполняют на одной из соединяемых деталей лепестки, а на другой соответственно пазы, фиксацию паяемых деталей производят путем установки лепестков в пазы и разворота выступающих лепестков, укладку припой производят с фиксацией на лепестки, при этом используют дозированный припой. Патент РФ 2236332. Б. П. Сучков, В. В. Шаломеев (НИИ приборостроения им. В. В. Тихомирова) [26].

Способ контактной сварки модулированным по амплитуде униполярным током, отличающийся тем, что модуляцию тока осуществляют изменением числа включаемых униполярных импульсов тока стабильной нормируемой величины $i_{ст}$, значение которой выбирают из условия $i_{ст} \leq 0,04i_{св.макс}$, где $i_{св.макс}$ — максимальное требуемое значение тока при сварке, при этом скорость нарастания или спада результирующего значения тока задают соответственно длительностью задержки включения или выключения каждого очередного импульса $i_{ст}$, с уменьшением которой скорость изменения результирующего значения тока увеличивается. Патент РФ 2236333. В. И. Бульчев, Н. А. Бычихин, М. Г. Зарубин и др. (Томский политехнический университет, ОАО «Новосибирский завод концентратов») [26].

Сварочное устройство для формирования подводного трубопровода посредством сварки вместо секций труб, отличающееся тем, что средство крепления оборудования выполнено поворотным с возможностью вращения вокруг в основном вертикальной оси и секторным, при этом каждая сварочная головка связана с соответствующим сектором поворотного средства крепления оборудования, установленного с возможностью вращения соответствующего его сектора вокруг секции трубы при вращении сварочной головки, связанной с данным сектором, вокруг секции трубы. Патент РФ 2236334. А. Беллони, Р. Бонасорт (Сайнем С.П.А., Италия) [26].

Способ наплавки электродной лентой, при котором электродную ленту предварительно профилируют, а затем подают к поверхности наплавляемой детали подающим механизмом, отличающийся тем, что ленту профилируют в виде продольных гофров с малой жесткостью и пластически деформируют в процессе подачи по ширине наплавляемого слоя. Патент РФ 2237555. М. З. Нафиков, Н. С. Юдин (Башкирский аграрный госуниверситет) [28].

Сварочный агрегат для выполнения передвижной электрической стыковой сварки на рельсовом пути, отличающийся тем, что предусмотрено индикаторное устройство для регистрации точного положения зажимных колодок для выполнения сварки, определенного по окончанию колебательного движения и прилеганию зажимных колодок к шейке рельсов, выполненное для подачи сигнала управления, необходимого для дальнейшего ведения процесса сварки. Патент РФ 2237556. Й. Тойрер, Л. Грубер (Франц Плассер Банбаумашинен-Индустригезельшафт мБХ, Австрия) [28].

Способ электронно-лучевой сварки, отличающийся тем, что одновременно с регистрацией тока коллектора электронов осуществляют осцилляцию электронного пучка по круговой или Х-образной траектории, и амплитуду колебаний составляющих спектра вторичного тока используют в диапазонах 200... 1000 Гц и 3... 50 кГц, при этом появление сквозного проплавления определяют по одновременному снижению амплитуд составляющих спектра в указанных диапазонах или по снижению амплитуды одной из составляющих спектра вторичного тока. Патент РФ 2237557. В. М. Язовских, Д. Н. Трушников, В. Я. Беленький и др. (Пермский ГТУ) [28].

Способ плакирования сваркой взрывом, включающий зачис-

тку свариваемых поверхностей плакируемого и плакирующего металлических листов, установку на дистанционные опоры плакирующего листа над плакируемым листом на расстоянии сварочного зазора, раскладку на плакирующем листе слоя заряда взрывчатого вещества с системой иницирования, раскладку первого слоя сыпучего материала на слое заряда взрывчатого вещества и над ним второго слоя сыпучего материала или слоя воды через воздушный зазор. Приведены и другие отличительные признаки способа. Патент РФ 2237558. Л. Б. Первухин, А. А. Бердыченко, Д. В. Олейников (Алтайский ГТУ им. И. И. Ползунова) [28].

Устройство для диффузионной сварки, отличающееся тем, что пресс, заполненный веществом и расширяющийся при нагреве, выполнен в виде однофазового сальфона, заглушенного по торцам толстостенными дисками, к которым приварены по наружному контуру тонкостенные мембраны. Патент РФ 2237559. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, В. П. Гордо, Г. Н. Шевелев (ФГУП «НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежалы») [28].

Устройство для диффузионной сварки кольцевых заготовок из разнородных металлов, отличающееся тем, что оно имеет газостат, а вакуумная камера выполнена в виде тонкостенной герметичной оболочки из пластичного металла с толщиной стенок не более 3 мм, при этом камера помещена в газостат с источником нагрева, совмещенным со средством сдавливания заготовок, в качестве которых использован нагретый нейтральный газ под давлением в закрытом объеме камеры газостата. Патент РФ 2237560. В. П. Гордо, В. Н. Елкин, Е. Н. Шевелев (То же) [28].

Разделка труб из разнородных сталей под диффузионную сварку с электронно-лучевым нагревом, отличающаяся тем, что по краям торца трубы из менее жаропрочной стали выполнены скосы с образованием между ними плоского кольца, средняя линия которого расположена ниже средней линии стенок трубы, а на торце трубы из более жаропрочной стали выполнена кольцевая центрирующая ступенька. Патент РФ 2237561. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, М. Н. Плышевский, Г. Н. Шевелев (То же) [28].

Способ сварки намагниченных трубопроводов при ремонтно-восстановительных работах, отличающийся тем, что перемещение материала торцевой зоны стыка осуществляют перед установкой бездефектного участка и сваркой до исключения в материале эффекта «магнитного дутья» путем концентрации магнитного поля в локальной зоне торцевого среза трубопровода до величины, равной действительной величине остаточного магнитного поля трубопровода, и по его значению создают в материале торцевой зоны остаточное магнитное поле, противодействующее упомянутому полю трубопровода, после чего в стык вводят бездефектный участок. Патент РФ 2237562. Л. В. Ольвинский [28].

Устройство для электронно-лучевой сварки, отличающееся тем, что оно оснащено соосными с основным раструбом дополнительными токопроводящими раструбами, сужающимися по дугам орбит электронов, установленными с общим смещением в широкой части каждого раструба при уменьшении поперечных сечений раструбов от области совмещения раструбов к противоположному концу каждого раструба, при этом дополнительные раструбы, размещающиеся у ускоряющего анода общим смещением в широкой части каждого раструба и у изделий узкой частью каждого раструба, снабжены продольными щелевыми прорезями, а магнитная линза образована основным раструбом и дополнительными раструбами. Патент РФ 2238179. В. Т. Доронин (Алтайский ГТУ им. И. И. Ползунова) [29].

Способ изготовления биметаллических изделий, отличающийся тем, что при сборке цилиндрическую заготовку вводят в трубную заготовку по свободной посадке с образованием зазора между заготовками, равного 0,002... 0,01 наружного диаметра трубной заготовки, после чего заваривают один торец и подвергают полученную биметаллическую заготовку холодному обжатию со степенью обжатия, равной 0,3... 15 %, заваривают второй торец, а деформацию проводят после нагрева, по меньшей мере, за один проход в шаговом режиме на стане прокат-



ки-ковки. Патент РФ 2238180. В. П. Востриков, К. И. Грамотнев, А. В. Садовский (ЗАО «Транском») [29].

Способ управления размером капли расплавленного металла при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки, отличающийся тем, что в качестве источника управляющего сигнала используют блок регистрации сварочного тока, а импульсы подачи проволоки производят в момент уравнивания минимального сварочного тока с заданным. Патент РФ 2238827. О. Г. Брунов, В. Т. Федько, В. В. Седнев, В. М. Гришагин (Томский политехнический университет) [30].

Способ электронно-лучевой сварки высокопрочных сталей, отличающийся тем, что при постоянных значениях полной удельной мощности и параметрах режима, второй проход после основного выполняют со сканированием электронного луча по кругу с соотношением осей 1:1 и заглублением фокуса на $1/2$ толщины соединения, а при выполнении третьего прохода со сканированием по эллипсу с соотношением осей 3:1 и расположением большей оси вдоль шва и заглублением фокуса на $1/3$ толщины соединения, причем частоту сканирования выбирают в соответствии с соотношением $f = (29,6 - 60)V_n/S$, где f — частота сканирования, Гц; V_n — относительная скорость перемещения зоны нагрева в процессе сварки; S — шаг перемещения пятна нагрева при осцилляции, мм. Патент РФ 2238828. А. С. Павлов (Нижегородские ОАО «Гидромаш») [30].

Пресс для диффузионной сварки, отличающийся тем, что противоположно расположенные подвижные стенки выполнены в виде соосно расположенных с зазором дисков, между кото-

рыми установлены две кольцевые мембраны, внутренние кромки которых неразъемно соединены между собой, а наружные кромки каждой из мембран неразъемно соединены с одним из дисков. Патент РФ 2238829. В. П. Гордо, А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев (ФГУП «НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежала») [30].

Способ соединения нефтепромысловых труб, отличающийся тем, что после обработки концов труб под сварку на их концевые участки изнутри наносят два адгезионных слоя путем плазменного напыления термостойкого металлического порошка на основе никеля с алюминием толщиной каждого слоя не более 0,15...0,20 мм, а коррозионностойкое покрытие наносят плазменным напылением трех слоев антикоррозионного термостойкого металлического порошка на основе никеля с хромом. Патент РФ 2238830. Н. Г. Ибрагимов, В. Г. Фадеев, Р. М. Гареев и др. (ОАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина) [30].

Состав сварочной ленты и проволоки, отличающийся тем, что он дополнительно содержит медь, алюминий, свинец, олово, сурьму, мышьяк, кобальт, РЗМ при следующем соотношении массовой доли элементов, %: 0,01...0,025 углерода; 0,16...0,35 кремния; 1,30...1,70 марганца; 23,00...24,50 хрома; 14,00...15,40 никеля; 0,001...0,010 серы; 0,001...0,015 фосфора; 0,01...0,05 алюминия; 0,01...0,025 азота; 0,01...0,08 меди; 0,0005...0,001 свинца; 0,001...0,005 мышьяка; 0,001...0,005 олова; 0,001...0,005 сурьмы; 0,005...0,05 кобальта; 0,05...0,10 РЗМ; остальное железо. Патент РФ 2238831. Г. П. Карзов, С. Н. Галяткин, Э. И. Михолева, И. А. Морозовская (ФГУП ЦНИИКМ «Прометей») [30].

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*

BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH (Польша), 2004. — Рос. 48, № 3 (польск. яз.)

Brozda J. et al. Исключение термической обработки сварных соединений труб (44×10 мм) из сталей 13CrMo4,4 и 10CrMo9,10, с. 42–47.

Brozda J. Жаропрочные стали нового поколения, их свариваемость и свойства

Winiowski A., Lis U. Новые легкоплавкие серебряные покрытия припой, с. 54, 57–59.

Klimpel A. et al. Влияние восстановительной плазменной и газоплазменной порошковой наплавки дефектов в отливках из сферидального чугуна на качество покрытия из эмали, с. 60–62, 65.

Slania J. Номограмма, корректирующая содержание феррита в швах, выполненных порошковыми проволоками типа 23/12. Построение и примеры практического применения, с. 66–67.

JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония) 2004. — Vol. 73, № 2 (яп. яз.)

Kitada T. P. Промежуточное положение черных металлов на рынке, с. 3–4.

Техническая спецификация. Влияние защитного газа на порообразование при лазерной сварке и способы его подавления, с. 5.

Oka Y. Специальный выпуск. СОТРУДНИЧЕСТВО В МЕДИЦИНЕ. Надежды на конструкторско-технологическое, медицинское и биологическое сотрудничество, с. 6–8.

Iseki H. et al. Медицина на искусственном интеллекте (конструкторско-медицинское сотрудничество), с. 9–12.

Okazaki Y. et al. Основные направления разработок металлических биоматериалов, с. 13–16.

Yamane T. Научные исследования и разработки искусственного сердца, с. 17–20.

Hase T. Сверхпроводящая проволока и ее применение, с. 21–24.

Tateishi T. Экономические аспекты проектирования живых тканей, с. 25–28.

Tanaka M. Курс лекций по дуговой сварке. Введение в теорию дуговой плазмы, с. 29–34.

Inoue T. Курс лекций для практикующих инженеров. Расслоение (образование продольных трещин), с. 35–40.



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



MATERIALS SCIENCE and TECHNOLOGY (Англия), 2003. — Vol. 19, № 3 (англ. яз.)

Tancret F. et al. Расчет стойких к коррозии суперсплавов на никелевой основе, предназначенных для электростанций. Ч. 1. Моделирование механических свойств, с. 283–290.

Tancret F., Bhadeshia H. K. D. Расчет стойких к коррозии суперсплавов на никелевой основе, предназначенных для электростанций. Ч. 2. Моделирование фазовой диаграммы и сегрегации, с. 291–295.

Tancret F. et al. Расчет стойких к коррозии суперсплавов на никелевой основе, предназначенных для электростанций. Ч. 3. Экспериментальные результаты, с. 296–302.

Sastry K. Y. et al. Образование трещин вследствие коррозии под напряжением, с. 375–381.

MATERIALS SCIENCE and TECHNOLOGY (Англия) 2003. — Vol. 19, № 4 (англ. яз.)

Wells M. A. et al. Математическая модель деформации и микроструктурного изменения в процессе горячей прокатки алюминиевого сплава 508, с. 467–476.

Robinson J. S., Tanner D. A. Развитие остаточных напряжений в высокопрочных алюминиевых сплавах при использовании стандартной и ретрогрессивной термообработок, с. 512–518.

Tosto S. et al. Микроструктура сплава Cu/AISI 304 L после электронно-лучевой сварки, с. 519–522.

PRAKTIKER (Германия), 2004. — № 4 (нем. яз.)

Новые продукты и услуги, с. 98–100.

Blum P. Пути выхода из кризиса метизной и электротехнической промышленности, с. 102–103.

Otainneck C. et al. Лазерная пайка в производстве транспортных средств, с. 104, 106–109.

Gebart A., Semmler U., Haase J., Chemnitz. Деформация и опасность возникновения трещин при частичной наплавке, с. 110.

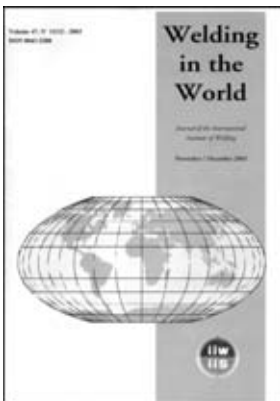
Zwatz R. Целесообразно ли Венское соглашение в сварочной технике? Ремонт гибочного пресса, с. 114.

J. von Beren et al. Лазерная сварка с одновременной чисткой, с. 118.

Schuster J. Трещины и коррозия, разумные практические выводы, с. 122.

Spieget-Ciobanu V.-E. Дискуссия о предельно допустимых концентрациях дыма, с. 124.

Показатели качества электродной проволоки для высокопроизводительной сварки МАГ, с. 126.



SCIENCE and TECHNOLOGY of WELDING and JOINING (Англия), 2003. — Vol. 8, № 1 (англ. яз.)

Lienert T. J., Lippoid J. C. Диаграмма улучшения свариваемости при импульсной лазерной сварке аустенитных нержавеющей сталей, с. 1–9.

Preston R. V. et al. Моделирование методом конечных элементов процесса сварки ТИГ алюминиевого сплава 2024, с. 10–18.

Bingul Z. et al. Сравнение процессов сварки МИГ на стабилизированном и импульсном токе на основании рассеяния тепла от анода, с. 19–28.

Nishimoto K. et al. Компьютерный расчет металла вставки для соединения в переходной жидкой фазе типа $\gamma/\gamma'/\beta$ высокоалюминиевого суперсплава на никелевой основе, с. 29–38.

Kuo T.-Y. et al. Оценка влияния добавок ниобия и марганца на сварные изделия на никелевой основе, с. 39–48.

Deo M. V., Michaleris P. Уменьшение выпучивания вследствие сварки благодаря использованию переходного термического натяжения, с. 49–54.

Deo M. V. et al. Дуговая стыковая сварка под флюсом стали для железобетонной арматуры, с. 55–61.

Tusek J. et al. Дуговая стыковая сварка под флюсом стали для железобетонной арматуры, с. 62–68.

Singh P. J. et al. Прогнозирование усталостной долговечности с использованием двухступенчатой модели для крестообразных соединений из стали AISI 304 L с разной геометрией углового шва, с. 69–75.

Zhou Z. S. et al. Численный анализ процесса теплопереноса в сварочной ванне при двухсторонней сварке ТИГ, с. 76–78.

WELDING JOURNAL (США), 2004. — Vol. 83, № 2 (англ. яз.)

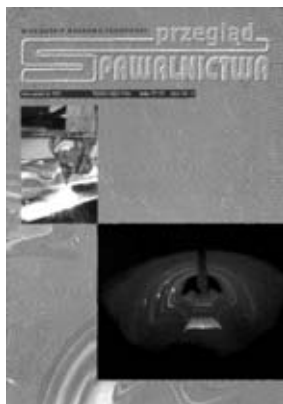
Occhialini C. Роботизированная сварка алюминиевых пространственных рам способствует скорейшему внедрению спортивных автомобилей, с. 24–27.

Anderson T. Новые разработки в области высокопрочных алюминиевых сплавов для военных и гражданских катеров, с. 28–30.

Schulze K., Powers D. E. ЭЛС алюминия без создания вакуума, с. 32–38.

Hancock R. Сварка трением алюминия сокращает стоимость энергии на 99%, с. 40–44.

Collins M. G. et al. Исследование трещин провала пластичности в металле сварных швов на основе никеля. Ч. 3, с. 39–49.





Huang C., Kou S. Образование ликвационных трещин при полном проплавлении сварных швов из Al-Cu, с. 50–58.

Kusko C. S. et al. Влияние коэффициента напряжения на распространение усталостных трещин в сварных швах из нержавеющей стали, с. 59–64.

Missori S. et al. Однопроходная лазерная сварка плакированной стальной плиты, с. 65–71.

СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО (Россия), 2004. — № 5 (рус. яз.)

Дильман В. Л., Остсеин А. А. Статическая прочность сварного соединения с твердыми прослойками и дефектами по линии сплавления шва, с. 3–7.

Вовк Л. П. Математическое исследование особенностей концентрации динамических напряжений в окрестности паяного шва в условиях резонанса, с. 7–12.

Махлин Н. М., Коротынский А. Е., Богдановский В. А. и др. Электронные регуляторы сварочного тока для многопостовых сварочных систем, с. 13–18.

Никифоров Н. И., Васильев К. В. Основные разработки ФГУП «ВНИИАВТОГЕНМАШ» в области термической резки и газопламенной обработки металлов (к 60-летию института), с. 19–21.

Никифоров Н. И., Васильев К. В. Оборудование для термической резки «ФГУП ВНИИАВТОГЕНМАШ», с. 22–27.

Дейкун В. К. Оптимизация основных рабочих характеристик одноступенчатых газовых редукторов, с. 28–30.

Бурякин А. В. Совершенствование аппаратуры для газотермического напыления, с. 30–33.

Калитин П. П., Жданов В. А. Сертификация продукции и техническое регламентирование автогенной техники, с. 33–35.

Еремин Е. Н. Электрошлаковая сварка кольцевых заготовок из жаропрочных сплавов, с. 35–38.

Юркевич С. Н., Мышковец В. Н., Максименко А. В. Лазерная наплавка деталей из стали 30ХГСА без снижения физико-механических свойств материала основы, с. 39–40.

Трегубов Г. П. Инновационные проблемы модернизации производственной среды рынка наукоемкой продукции, с. 41–43.

Бернадский В. Н., Маковецкая О. К. Вклад сварки в экономику США, с. 43–50.

СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО (Россия), 2004. — № 6 (рус. яз.)

Попков А. М. Методика определения скоростей нагрева и охлаждения металла при сварке и времени его пребывания, с. 3–5.

Никитинский А. М., Герасимов Е. А., Пигалов С. А. Влияние различных химических соединений на технологические свойства флюсов для пайки меди и латуни, с. 10–16.

Бурyleв Б. П., Мойсов Л. П., Лаптев Д. М. Расчет энтальпий многокомпонентных шлаковых расплавов, с. 17–22.

Михеев А. А. Диффузионная сварка магнитных сплавов, с. 22–25.

Гнюсов С. Ф., Трущенко Е. А., Советченко Б. Ф. Сварка трением стали Р6М5 в режиме сверхпластичности. Ч. III. Изучение структуры, фазового состава и свойств соединений в процессе варки, с. 26–30.

Кисилев Г. С. Особенности применения сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) в производстве криогенного оборудования, с. 31–32.

Леонтьев Л. Б., Арон А. В. Свойства сварных соединений чугуна, выполненных различными способами сварки и наплавки, с. 32–38.

Иванов Г. А., Проничева В. Н. Компьютерные программы для решения задач проектирования технологических процессов сварки, с. 39–42.

Глебова М. А., Корнев А. Б., Глебов В. В., Березин Е. К. Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучом, с. 43–46.

Горбач В. Д., Евдокимов Ю. А. Инфракрасное излучение при дуговой сварке металлов в судостроении, с. 46–52.

Суслов А. А. 4-й Московский международный салон инноваций и инвестиций, с. 53–57.