

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**Главный редактор
Б. Е. ПАТОНЮ. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,
В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**Н. П. Алешин (Россия)
Гуань Цяо (Китай)
А. С. Зубченко (Россия)
М. Зиниград (Израиль)
В. И. Лысак (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
О. И. Стеклов (Россия)
Г. А. Туричин (Россия)**УЧРЕДИТЕЛИ:**Национальная академия наук Украины,
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,
МА «Сварка»**Адрес редакции:**Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru**Редакторы:**Т. В. Юштина, И. Ф. Соколова
Электронная верстка:
И. Р. Наумова, А. И. Сулима,
Д. И. СеретаСвидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001**Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней**Журнал переиздается
на английском языке
Институтом электросварки
им. Е. О. Патона под названием
«The Paton Welding Journal»**The Paton
WELDING JOURNAL**За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная**СОДЕРЖАНИЕ****НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

- Назаренко О. К., Гурин О. А., Болгов Э. И.* Особенности токовой защиты источников питания для электронно-лучевой сварки 3
- Махненко О. В., Мирзов И. В.* Исследование напряженно-деформированного состояния сварных конструкций из аустенитной стали в условиях радиационного облучения 7
- Черняк Я. П.* Разработка порошковой проволоки ферритного класса для наплавки деталей из высокоуглеродистых сталей 13
- Скуба Т. Г., Долинченко В. В., Коляда В. А., Шаповалов Е. В.* Алгоритм технологической адаптации для автоматизированной многопроходной сварки МИГ/МАГ изделий с переменной шириной разделки кромок 16
- НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**
- Скальский В. Р., Лясота И. Н., Станкевич Е. М.* Особенности сигналов акустической эмиссии при оценке механизма разрушения сварных соединений алюминиевых сплавов 23

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Селивестров А. Г., Ткаченко Ю. М., Куликовский Р. А., Брагинец В. И., Зяхор И. В.* Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений титанового сплава BT3-1 29
- Протоковили И. В., Порохонько В. Б., Петров Д. А.* Технологические особенности электрошлаковой сварки титана в узкий зазор 35
- Размышляев А. Д., Миронова М. В., Ярмонов С. В.* Устройства ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки (Обзор) 40
- Русев Г. М., Русев А. Г., Овсянников В. В., Быковский О. Г., Пасько А. Н.* Влияние параметров режима плазменного напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц 45
- Соловей С. А.* Повышение циклической долговечности тавровых сварных соединений с непроварами в корне шва высокочастотной механической проковкой 48

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Диссертация на соискание ученой степени 54

ХРОНИКА

- Наши поздравления (Б. А. Мовчану, Д. М. Калеко, П. А. Косенко, П. П. Проценко) 55
- Памяти В. И. Махненко 59
- ИНФОРМАЦИЯ**
- Календарь выставок и конференций в 2013 г. (сварка и родственные технологии) 61
- Правила для авторов журнала 63

Журнал «Автоматическая сварка» представлен в «Google Scholar» (США), РИНЦ (Россия), реферативных журналах «Джерело» (Украина), «Сварка» (Россия), «Welding Abstracts» (Великобритания), реферирован в «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия), освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
Guan Qiao (China)
A. S. Zubchenko (Russia)
M. Zinigrad (Israel)
V. I. Lysak (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
O. I. Steklov (Russia)
G. A. Turichin (Russia)
G. A. Turichin (Russia)

FOUNDERS:

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

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Editors:

T. V. Yushina, I. F. Sokolova
Electron galley:
I. R. Naumova, A. I. Sulima,
D. I. Sereda

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.

The journal is republished in English
by the E. O. Paton Electric Welding Institute
under title «The Paton Welding Journal»

The Paton
WELDING JOURNAL

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Nazarenko O. K., Gurin O. A., Bolgov E. I.* Peculiarities of current protection of power sources for electron beam welding 3
Makhnenko O. V., Mirzov I. V. Investigation of stress-strain state of welded structures of austenite steel under the conditions of radiation 7
Chernyak Ya. P. Development of flux-cored wire of ferrite grade for hardfacing of parts of high-carbon steels 13
Skuba T. G., Dolinenko V. V., Kolyada V. A., Shapovalov E. V. Algorithm of technological adaptation for automatic multi-pass MIG/MAG welding of products with variable width of edge preparation 16

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDED JOINTS

- Skalsky V. R., Lyasota I. N., Stankevich E. M.* Peculiarities of acoustic emission signals at evaluation of fracture mechanism of welded joints of aluminium alloys 23

INDUSTRIAL

- Selivestrov A. G., Tkachenko Yu. M., Kulikovskiy R. A., Braginets V. I., Zykhor I. V.* Effect of parameters of friction welding conditions on structure and mechanical properties of joints of titanium alloy VT3-1 29
Protokovilov I. V., Porokhonko V. B., Petrov D. A. Technological peculiarities of electroslag narrow-gap welding of titanium 35
Razmyshlyayev A. D., Mironova M. V., Yarmonov S. V. Devices of input of transverse magnetic field for the processes of arc welding and surfacing (Review) 40
Rusev G. M., Rusev A. G., Ovsyannikov V. V., Bykovskiy O. G., Pasko A. N. Effect of parameters of plasma spraying conditions using current-carrying wire on fraction composition of spraying particles 45
Solovey S. A. Improvement of cyclic life of T-welded joints with lacks of penetration in weld root using high-frequency mechanical peening 48

BRIEF INFORMATION

- Thesis for scientific degree 54

NEWS

- Our congratulations (to B. A. Movchan, D. M. Kaleko, P. A. Kosenko, P. P. Protsenko) 55
In memory of V. I. Makhnenko 59

INFORMATION

- Calendar of exhibitions and conferences in 2013 (welding and related technologies) 61
Rules for the journal authors 63

Presented in «Google Scholar» (USA), RINTS (Russia)

journals of abstracts «Dzherelo» (Ukraine), «Svarka» (Russia), «Welding Abstracts» (Great Britain), abstracted in «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Poland) and «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy), used in reviews of Japanese journals «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology»



ОСОБЕННОСТИ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

О. К. НАЗАРЕНКО, О. А. ГУРИН, Э. И. БОЛГОВ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Целью исследований являлась выработка рекомендаций по уменьшению нарушений формирования швов в процессе электронно-лучевой сварки, если из-за вакуумного пробоя в сварочной пушке сработала токовая защита источника ускоряющего напряжения или из-за замыкания цепи управляющий электрод — катод превышено заданное значение тока пучка. Ввиду случайного характера возникновения отмеченных нестационарных процессов в используемый в эксперименте источник ускоряющего напряжения были временно встроены нормально разомкнутый короткозамыкатель цепи управляющий электрод — катод и разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием между жилой к управляющему электроду и землей. Это позволило непосредственно в процессе сварки замыкать любую из цепей, фиксировать осциллограммы тока нагрузки и ускоряющего напряжения, после чего сопоставлять осциллограммы с произошедшим нарушением формирования шва. Установлено, что для уменьшения нарушения формирования шва при пробое в пушке высоковольтный источник питания должен за время около 0,1 мс перейти в режим автоматического повторного включения. Ток порог этого перехода должен в 3...4 раза превышать максимальный ток нагрузки источника с учетом пускового тока при асинхронном включении источника питания, токов зарядки емкостей высоковольтного кабеля и выходного фильтра. При коротком замыкании цепи управляющий электрод — катод источник ускоряющего напряжения должен автоматически перейти в режим стабилизации тока пучка после превышения в течение 3... 5 мс его установленного значения на 20...30 %. Библиогр. 3, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, источник ускоряющего напряжения, трехэлектродная эмиссионная система, пробои ускоряющего промежутка, замыкание управляющего электрода с катодом, физическое моделирование, требования к токовой защите

В эмиссионной системе сварочной пушки возможно развитие электрических пробоев вакуумной изоляции между управляющим электродом и анодом. Зазор между управляющим электродом и катодом часто перекрывается каплями расплавленного металла из сварочной ванны. Возможно также нарушение электрической изоляции между жилами высоковольтного кабеля, соединенными с катодом и управляющим электродом. Во всех этих случаях происходит неконтролируемое повышение тока пучка, нарушающее формирование шва.

Резкое отключение источника ускоряющего напряжения при срабатывании максимальной токовой защиты крайне нежелательно, так как вызывает серьезный дефект шва в виде сквозного кратера, незаполненного жидким металлом. Поэтому прежде всего требуется обеспечить минимальное нарушение формирования шва, а затем уже отключать источник ускоряющего напряжения. Если источник был отключен, то в случае его повторного асинхронного включения недопустимо срабатывание токовой защиты из-за пускового тока источника питания, значительно превышающего рабочий ток ввиду броска тока намагничивания силового трансформатора [1], зарядки емкостей высоковольтного кабеля и выходного фильтра. Именно эти токи при автомати-

ческом повторном включении источника, даже в режиме так называемого мягкого, т. е. замедленного пуска, могут вызвать ложное срабатывание токовой защиты, если отсутствует ее временная задержка и установлен слишком низкий порог срабатывания.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию алгоритмов и динамики срабатывания токовой защиты при пробоях и токовой перегрузке в пушке с целью уменьшения нарушений формирования швов.

Методика исследования. При исследованиях использовали высоковольтный инверторный источник питания мощностью 6 кВт с ускоряющим

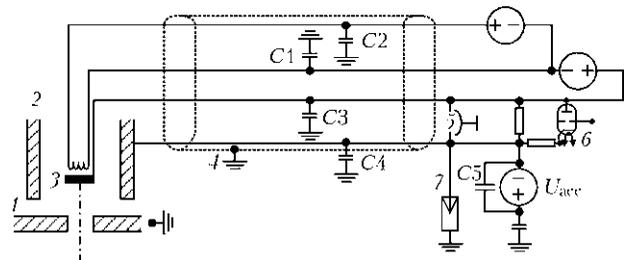


Рис. 1. Схема экспериментальной аппаратуры: 1 — анод; 2 — управляющий электрод; 3 — катод; 4 — высоковольтный кабель; 5 — короткозамыкатель цепи управляющий электрод — катод; 6 — регулятор тока пучка; 7 — разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием (U_{acc} — источник ускоряющего напряжения; $C1...C4$ — распределенные емкости жил кабеля относительно земли; $C5$ — емкость фильтра)



напряжением 60 кВ, созданный в результате совместной работы коллективов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и ООО «Торсион» (г. Харьков). При токах нагрузки до 0,1 А источник работает в режиме стабилизации ускоряющего напряжения. Благодаря наличию в цепи нагрузки токового датчика при коротких замыканиях возможен переход стабилизатора напряжения в режим стабилизации тока, что ограничивает ток нагрузки. На выходе высоковольтного фильтра включен балластный резистор, ограничивающий максимальную амплитуду тока через выходной высоковольтный выпрямитель при коротком замыкании в нагрузке и предотвращающий возникновение паразитных резонансных процессов в выходном кабеле [2].

Из-за случайного характера возникновения вакуумного пробоя сложно зафиксировать его электрические и временные параметры для сопоставления их с нарушениями формирования шва. Поэтому в высоковольтный источник питания временно были встроены нормально разомкнутый короткозамыкатель цепи управляющий электрод — катод и разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием между жилой к управляющему электроду и землей (рис. 1). Это позволяет непосредственно в процессе сварки образца в выбранное время замыкать любую из цепей, фиксировать осциллограммы тока нагрузки и ускоряющего напряжения, сопоставляя их с произошедшим нарушением формирования шва. В качестве регистратора использовали цифровой электронный осциллограф Tektronix TDS-2014 с полосой пропускания 100 МГц и частотой выборки 1 Гвыб/с.

Результаты и их обсуждение. При экспериментальных исследованиях выявлена необходимость различных подходов к алгоритмам работы токовой защиты источника питания с целью возможности выполнения электронно-лучевой сварки при имитации пробоев в пушке и при коротком

замыкании цепи управляющий электрод — катод (диодный режим работы пушки).

На рис. 2 приведены осциллограммы тока пучка и ускоряющего напряжения при имитации электрического пробоя между управляющим электродом и анодом пушки непосредственно в процессе сварки. Источник ускоряющего напряжения принудительно переводится в режим автоматического повторного включения с целью предотвращения серьезного нарушения формирования сварного шва и выхода источника из строя [3]. Длительность фронтов отключения ускоряющего напряжения и соответствующего броска тока нагрузки составляет около 0,1 мс. Ускоряющее напряжение отсутствует в течение 7,5 мс, что позволяет восстановить электрическую прочность вакуумного промежутка эмиссионной системы пушки. Затем ускоряющее напряжение достаточно медленно — за 2,5 мс — восстанавливается по линейному закону.

Восстановление ускоряющего напряжения может быть выполнено значительно быстрее, но тогда из-за соответствующего увеличения скорости нарастания тока пучка возможны выплески металла из сварочной ванны. Кроме того, мягкий пуск ускоряющего напряжения уменьшает пусковой ток источника, а также замедляет зарядку емкостей фильтра и высоковольтного кабеля, благодаря чему возможно некоторое уменьшение требований к максимальному току источника питания. Тем не менее, как следует из рис. 2, значение броска тока нагрузки в момент повторного включения ускоряющего напряжения достигает 0,35 А, т. е. превышает максимальный рабочий ток источника (0,1 А), по крайней мере, в 3...4 раза. Естественно, если уменьшить порог превышения допустимого тока, то даже если электрическая прочность вакуумного промежутка уже восстановилась, будут неограниченное время происходить ложные срабатывания защиты источника и процесс сварки не сможет восстановиться. Отметим, что в отсутствие ускоряющего напряжения на осциллограмме фиксируется протекание некоторого нагрузочного тока, по всей вероятности, между катодом, находящимся под остаточным отрицательным потенциалом, и управляющим электродом. При нарастании ускоряющего напряжения происходит возрастание переходного тока, на значение которого влияет цепь стабилизации тока пучка. Если отсутствуют серьезные неисправности аппаратуры, то общая длительность восстановления нормальной работы оборудования не превышает долей секунды и требуется, в худшем случае, ремонтный сварочный проход по участку нарушения формирования шва.

В рассматриваемом случае перевод источника ускоряющего напряжения в режим автоматического повторного включения значительно эффек-

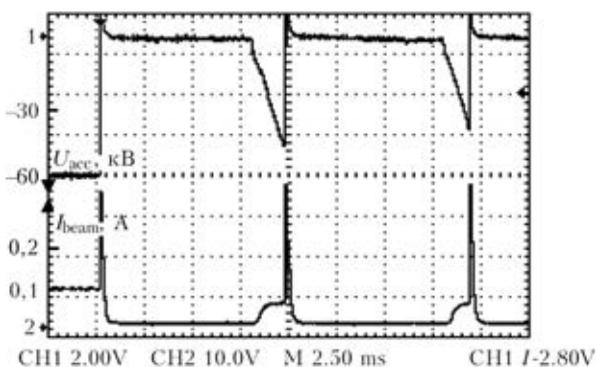


Рис. 2. Динамика изменения тока пучка I_{beam} и ускоряющего напряжения U_{acc} при имитации электрического пробоя в пушке вакуумного промежутка управляющий электрод — катод непосредственно в процессе электронно-лучевой сварки

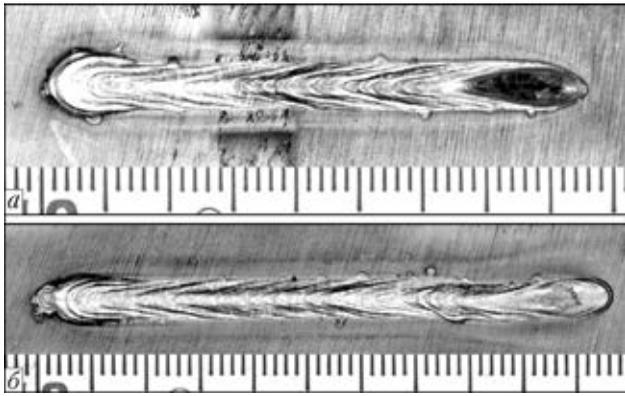


Рис. 3. Внешний вид швов, прерванных в момент замыкания цепи управляющий электрод — катод: *a* — образование дефекта в виде кратера при отключении ускоряющего напряжения максимальной токовой защитой; *б* — бездефектное окончание шва благодаря переходу источника из режима стабилизации ускоряющего напряжения в режим стабилизации тока пучка

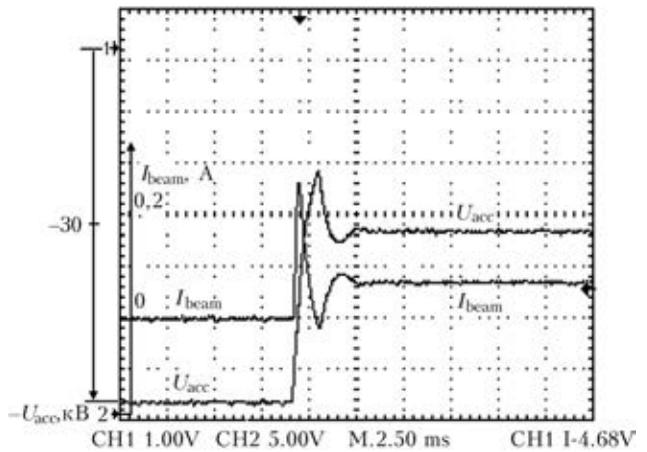


Рис. 4. Динамика изменения тока пучка I_{beam} и ускоряющего напряжения U_{acc} при имитации короткого замыкания управляющего электрода с катодом непосредственно в процессе электронно-лучевой сварки

Характеристика токовой защиты источника питания для электронно-лучевой сварки

Нарушение режима сварки	Причина нарушения	Алгоритм работы токовой защиты	Время срабатывания, мс
Ток пучка в 3...4 раза превысил максимальный ток нагрузки источника	Электрический пробой между управляющим электродом и анодом	Принудительное переключение источника ускоряющего напряжения в режим автоматического повторного включения	~0,1
Ток пучка достиг значения, соответствующего диодному режиму эмиссионной системы пушки	Короткое замыкание цепи управляющий электрод — катод	Принудительное переключение источника из режима стабилизации напряжения в режим стабилизации тока	2...5

тивнее принудительного переключения источника ускоряющего напряжения в режим источника тока, поскольку из-за протекания тока поддерживаются ионизационные процессы в вакуумном промежутке, препятствующие восстановлению его электрической прочности.

Наоборот, как будет показано ниже, при переходе эмиссионной системы в диодный режим из-за короткого замыкания цепи управляющий электрод–катод оказывается полезным принудительное переключение источника ускоряющего напряжения в режим источника тока. При замыкании этой цепи ток возрастает до уровня, соответствующего полностью отпертой эмиссионной системе. Отключение в этот момент ускоряющего напряжения приводит к образованию дефекта в виде незаполненного жидким металлом глубокого кратера с многочисленными усадочными трещинами (рис. 3, *a*).

Перевод источника ускоряющего напряжения в режим источника тока с соответствующим снижением ускоряющего напряжения позволяет избежать образования этого дефекта (рис. 3, *б*).

На рис. 4 приведены осциллограммы тока пучка и ускоряющего напряжения при имитации электрического пробоя между управляющим электродом и катодом пушки. В момент замыкания управляющего электрода с катодом, когда эмис-

сионная система переходит в диодный режим, ток пучка возрастает от установленного значения 0,1 до 0,25 А. По истечении 3...5 мс срабатывает токовая защита, программный порог которой равен 0,13 А, т. е. на 30 % превышает уровень тока пучка, и источник напряжения переходит в режим стабилизации этого значения. Для поддержания такого тока источник генерирует напряжение около 30 кВ. Таким образом, мощность пучка снижается от 6 до 3,9 кВт, и, главное, при снижении ускоряющего напряжения пучок значительно перифокусируется (фокусное пятно поднимается относительно поверхности изделия), в результате чего объем расплавленного металла существенно сокращается. Происходит бездефектное окончание формирования шва без фиксации кратера, после чего источник может быть выключен для выполнения необходимых восстановительных работ.

В таблице приведены оптимальные характеристики токовой защиты источника ускоряющего напряжения.

Выводы

1. При пробое в эмиссионной системе сварочной пушки высоковольтный источник питания должен за время около 0,1 мс перейти в режим автоматического повторного включения. Токвый порог этого перехода должен в 3...4 раза превышать



максимальный ток нагрузки источника с учетом пускового тока при асинхронном включении источника питания, токов зарядки емкостей высоковольтного кабеля и выходного фильтра.

2. При коротком замыкании цепи управляющий электрод — катод источника ускоряющего напряжения должен автоматически перейти в режим стабилизации тока пучка после превышения

на 20...30 % его установленного значения в течение 3...5 мс.

1. *Шабод М. А.* Максимальная токовая защита. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 96 с.
2. *Назаренко О. К., Матвейчук В. А.* Ограничение перенапряжений в высоковольтных цепях после разрядов в сварочной пушке // Автомат. сварка. — 2011. — № 10. — С. 40–43.
3. *Pat. 3042652 DE.* Method and apparatus for electron beam welding / V. K. Lebedev, O. K. Nazarenko, V. E. Lokshin et al. — Publ. 02.04.1982.

Поступила в редакцию 15.10.2012

ЦІЛЬОВА КОМПЛЕКСНА ПРОГРАМА НАН УКРАЇНИ «ПРОБЛЕМИ РЕСУРСУ І БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ, СПОРУД ТА МАШИН»

*Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр.
Науковий керівник — академік Б. Є. Патон*

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2010–2012 рр., до реалізації якої було залучено 26 інститутів НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Розділ 1. Розробка методологічних основ оцінки технічного стану та обґрунтування безпечного терміну експлуатації конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки на території України.

Розділ 2. Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.

Розділ 3. Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.

Раздел 4. Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики.

Розділ 5. Підвищення надійності та подовження ресурсу енергетичного обладнання і систем.

Розділ 6. Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.

Розділ 7. Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.

Розділ 8. Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою продовження терміну їх експлуатації.

Розділ 9. Підготовка нормативних документів і науково-технічних посібників з питань оцінки ресурсу об'єктів тривалої експлуатації.

Проблеми ресурсу
і безпеки експлуатації
конструкцій, споруд
та машин





УДК 621.791:621.039.6

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

О. В. МАХНЕНКО, И. В. МИРЗОВ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выгородка ядерного реактора подвержена высоким дозам радиационного облучения, приводящим к ее заметному деформированию и смыканию зазора между выгородкой и стенкой шахты. Это влечет за собой изменение теплообмена в активной зоне, последствия которого могут быть опасны с точки зрения нарушения температурного режима работы реактора. Для оценки радиационного распухания выгородки была создана двухмерная конечно-элементная модель, в которой использовались отработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины расчетные алгоритмы, где в качестве радиационного распухания задавались изотропные объемные деформации. Модель нелинейно учитывает зависимость радиационного распухания материала выгородки от температуры облучения, напряженного состояния и пластических деформаций. В модели также описано изменение предела текучести материала стенки сварной шахты как функция температуры облучения и накопленной радиационной дозы. После 25 лет эксплуатации реактора максимальное значение деформаций распухания в материале выгородки составляет 1,3 %, после 40 лет — 1,8, после 60 лет — 3,7. Максимальные радиальные перемещения внешней поверхности выгородки в процессе эксплуатации реактора составляют 11,2 мм после 25 лет, 12,9 мм после 40 лет, 16,1 мм после 60 лет. В более консервативной модели, не учитывающей историю накопления объемных деформаций, за 60 лет эксплуатации выгородка распухает на 26 %, что соответствует еще большим радиальным перемещениям внешней поверхности выгородки наружу. Результаты по распуханию и радиальным деформациям выгородки, полученные с учетом напряженного состояния, свидетельствуют о возможном контакте выгородки со сварной стенкой шахты в течение эксплуатации реактора. Такой контакт может сильно повлиять на напряженно-деформированное состояние сварной конструкции шахты, поэтому требует более детального изучения. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: сварные металлические конструкции, аустенитная сталь, напряженно-деформированное состояние, выгородка, ресурс реактора, радиационное распухание, численная модель, стенка шахты

В ядерном реакторе источником энергии служат радиоактивные тепловыделяющие элементы стержневой формы (ТВЭЛ). Они группируются в тепловыделяющие сборки (ТВС), образующие активную зону, которую окружает стальная обечайка цилиндрической формы — выгородка (рис. 1), изготавливаемая из аустенитной стали методомковки. В свою очередь ТВС и выгородка размещены в сварной конструкции шахты реактора и крепятся к ее граненому поясу. Основное назначение выгородки — группирование ТВС в активную зону, уменьшение интенсивности нейтронного потока на корпус реактора, обеспечение циркуляции теплоносителя по проектному тракту [1].

Высота выгородки реактора ВВЭР-1000 (рис. 2) — 4070 мм. Она состоит из пяти колец одинаковой высоты, скрепленных между собой шпильками. Внутренняя поверхность колец граненая. Радиус выгородки в месте соединения колец 1742,5 мм. Выгородка циклически симметрична относительно сектора в 60°, что существенно упрощает процесс моделирования.

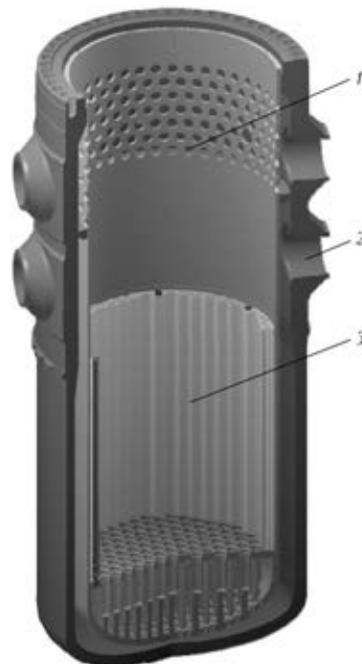


Рис. 1. Конструкция реактора: 1 — шахта; 2 — корпус; 3 — выгородка

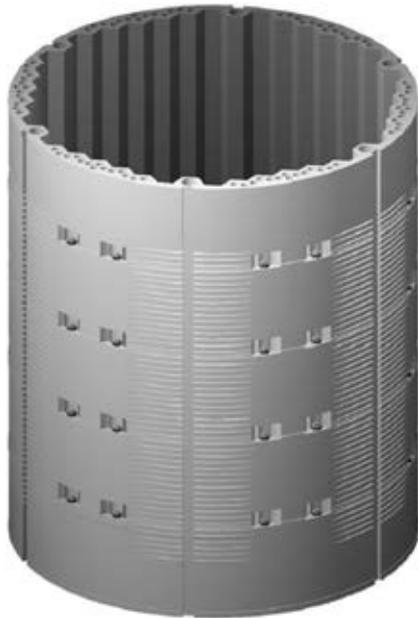


Рис. 2. Общий вид выгородки

Поперечное сечение выгородки (перпендикулярно оси) показано на рис. 3. Диаметр малых каналов 70 мм, диаметр большого канала 130 мм.

Выгородка и стенка сварной шахты ядерного реактора подвержены высоким дозам радиационного облучения, которое вызывает возникновение целого комплекса дефектов, приводящих к деградации физико-механических свойств. В хромоникелевых сталях в рассматриваемых условиях нагрева 400...550 °С происходят микроструктурные превращения с переходом частично из аустенитного в ферритное состояние с образованием карбидов хрома, титана, молибдена и других примесных металлов [2]. Тем не менее основная фаза — аустенит — сохраняет около 90 % общего объема. Так, при высокотемпературном облучении интенсивными нейтронными потоками в аустенитных сталях и сплавах на основе никеля, титана, молибдена, бериллия зарождаются и растут вакансионные поры, что приводит к заметному увеличению объема металла — радиационному набуханию. Этот процесс в значительной степени зависит от радиационной дозы, темпе-

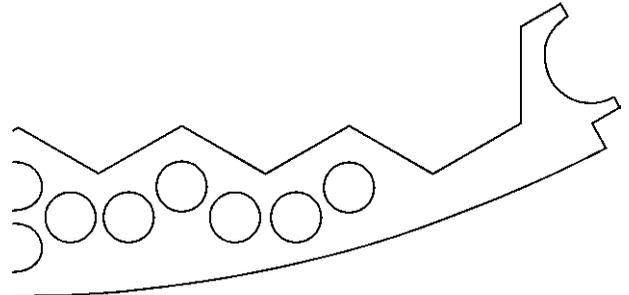


Рис. 3. Сечение выгородки, сектор 30°

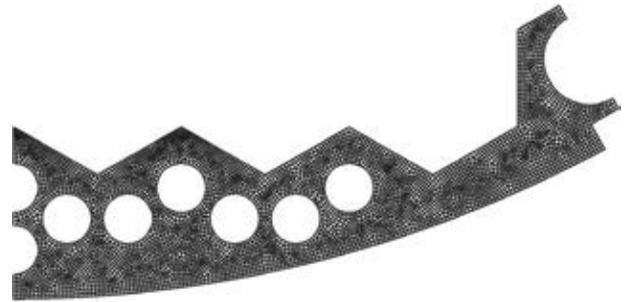


Рис. 4. Двухмерная конечно-элементная модель выгородки, сектор 30°

ратуры облучения и обусловленных распуханием напряжений и пластических деформаций в материале [1–3].

Радиационное распухание материала выгородки приводит к ее деформированию и смыканию зазора между ней и стенкой шахты, что влечет за собой изменение теплообмена в активной зоне, последствия которого могут быть опасны с точки зрения нарушения температурного режима работы реактора. Полное смыкание зазора между выгородкой и стенкой шахты и дальнейшее распухание выгородки приводит к значительному деформированию стенки шахты и росту напряжений, что может привести к ее разрушению. Прогнозирование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) выгородки и сварной конструкции стенки шахты в процессе эксплуатации, в том числе для обоснования продления ресурса действующих энергоблоков ВВЭР-1000 до 60 лет, является сегодня крайне актуальной задачей.

Таблица 1. Физические свойства стали 08X18H10T [4, 5] (коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ [1])

Температура T , °С	Модуль Юнга E , ГПа	Коэффициент линейного расширения α , $\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	Теплопроводность λ , Вт $\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	Удельная теплоемкость c_p , Дж $\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	Плотность ρ , кг/м ³
20	205	—	16,6	478	7900
100	200	16,6	17,2	495	7862
200	190	17,0	18,0	516	7821
300	180	17,4	18,7	537	7778
400	170	17,8	19,4	558	7732
500	165	18,2	20,1	579	7684
600	160	18,5	20,8	600	7634

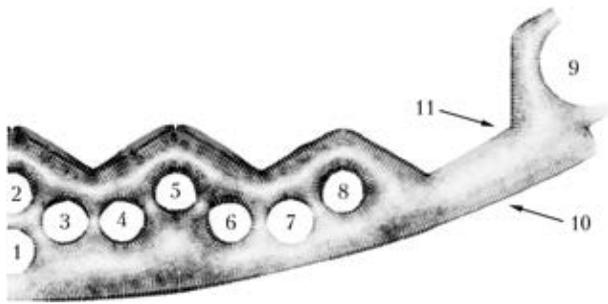


Рис. 5. Тепловые потоки в выгородке: 1–9 — поверхности каналов; 10, 11 — свободные поверхности

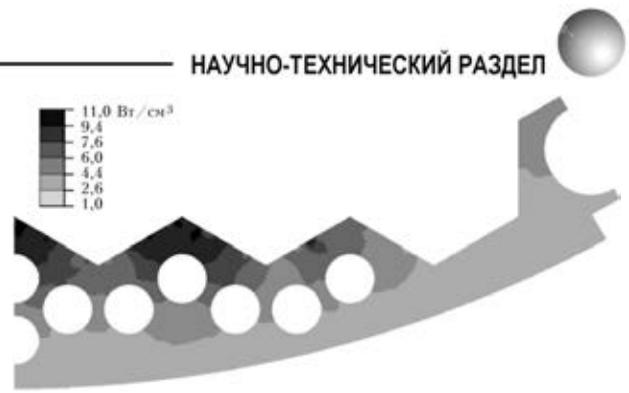


Рис. 6. Объемные тепловыделения в выгородке при работе реактора на полной мощности

Материал выгородки — аустенитная сталь 08X18H10T, химический состав которой следующий, мас. %: 0,8 Si; 0,3 Cu; 2,0 Mn; 10,0 Ni; 0,4 Ti; 0,035 P; 18,0 Cr; 0,02 S. Физические свойства стали 08X18H10T, приведенные в табл. 1, соответствуют начальному (необлученному) состоянию.

Для оценки радиационного распухания выгородки создали двухмерную конечно-элементную модель (рис. 4). Специально для моделирования поведения выгородки выбрали сечение, где значения повреждающей дозы и энерговыделения максимальные. Используются условия циклической симметрии для сектора выгородки в 60° и симметрия относительно прямой, делящей этот сектор на два равных сектора в 30°. Каждая из соответствующих механических задач была решена в условиях обобщенной плоской деформации. Модель, созданная из линейных четырех- или трехузловых элементов в виде четырех- или треугольников, содержит 10486 узлов и 9748 элементов.

Распределение температуры в выгородке в процессе расчета распухания постоянное и определено предварительным нестационарным термодинамическим расчетом (выход реактора на режим максимальной мощности). В качестве граничных условий заданы температуры теплоносителя в каналах и на свободных поверхностях выгородки (рис. 5, табл. 2), а также соответствующие коэффициенты теплопередачи. Учтены объемные тепловыделения в материале выгородки (рис. 6).

Потоки тепла (q , Вт/м²) определяются по формуле

$$q = -h(\theta_{in} - \theta_{out}), \quad (1)$$

где θ_{in} — температура поверхности, °С; h — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); θ_{out} — температура теплоносителя, °С.

Расчетным методом найдены значения напряжений и деформаций в выгородке, возникающие при выходе реактора на режим полной мощности. Это НДС заложено в расчет распухания в качестве начальных условий.

Результат расчета температурных полей приведен на рис. 7. Картина и абсолютные значения температуры полностью соответствуют результатам, приведенным в работе [1].

Затем для оценки формоизменения выгородки в течение 60 лет работы реактора проводилось прослеживание по времени возникновения и развития деформаций радиационного распухания и соответственно изменения НДС в условиях постоянного распределения температуры. Периодические охлаждения выгородки при остановках реактора не учитывались, поскольку расчетным путем для одного цикла охлаждения–нагрев было определено, что это не вызывает перераспределения остаточных деформаций. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен большой опыт решения нелинейных задач прослеживания возникновения и развития пластических деформаций при сварке и последующем охлаждении [6], поэтому для решения данной задачи использовали отработанные расчетные алгоритмы, где в качес-

Таблица 2. Температура теплоносителя и значения коэффициентов теплопередачи для различных поверхностей выгородки [1]

Номер поверхности по рис. 5	Температура на поверхности, °С	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)
1, 6, 8	291,7	2308
2...5; 2...7	292,1	1331
9	291,7	1115
10	291,7	15900
11	320	39017



Рис. 7. Распределение температуры в выгородке реактора при работе на максимальной мощности

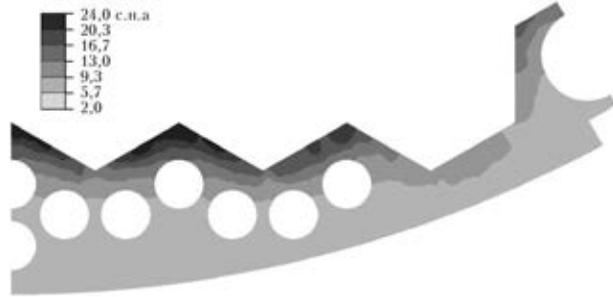


Рис. 8. Повреждающая доза облучения, 22-й топливный цикл
 тве объемных эффектов задавали деформации радиационного распухания в виде изотропных объемных деформаций. Прирост распухания материала вычисляется на каждом временном шаге. Тогда же пересчитываются значения повреждающей дозы (рис. 8), предела текучести, средние напряжения и пластические деформации в каждом конечном элементе. Размер шага по времени составляет 1 год, что обеспечивает достаточную точность в расчете распухания выгородки на случай 25, 40 и 60 лет эксплуатации реактора.

Зависимость распухания S_i рассматриваемого материала в определенный момент времени можно представить в виде [2, 7, 8]

$$S_i = C_D D_i^n f_0(T) f_1(\sigma_m) f_3(\kappa), \quad S_i > 0, \quad (2)$$

где D_i^n — доза облучения, с.н.а (с.н.а — смещения на атом); $f_0(T) = \exp(-r(T - T_{\max})^2)$; $f_1(\sigma_m) = 1 + P\sigma_m$; $f_3(\kappa) = \exp(-\eta\kappa)$; C_D, n, r, P, η — безразмерные константы ($C_D = 1,035 \cdot 10^4$, $n = 1,88$, $r = 1,1 \cdot 10^{-4}$, $P = 4 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$, $\eta = 8,75$); $T_{\max} = 470 \text{ }^\circ\text{C}$; T — температура облучения, $^\circ\text{C}$; $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ — средние напряжения; $\kappa = \int_0^D d\varepsilon_i^p$, где $d\varepsilon_i^p$ — интенсивность приращений пластических деформаций, равная

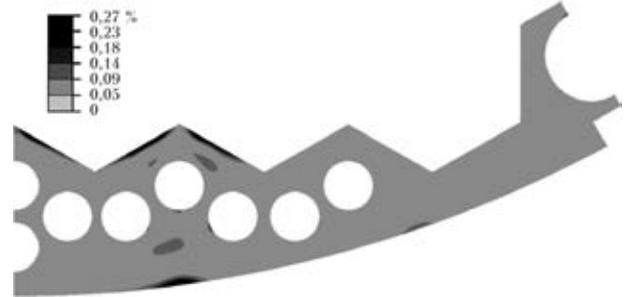


Рис. 10. Интенсивность пластических деформаций в выгородке после выхода реактора на режим

$$d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}, \quad i, j = 1 \dots 3.$$

Суммарное распухание по всем N временным шагам ищется как сумма приращений распухания на каждом шаге:

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^N dS_i, \quad dS_i > 0.$$

Эта модель учитывает историю накопления объемных деформаций вследствие радиационного облучения.

Предел текучести материала выгородки и шахты под действием температуры и радиационного облучения изменяется в соответствии с зависимостью [2]

$$\sigma_{0,2} = 153 + 239 \exp(-2,22 \cdot 10^{-3}(T + 273)) + 365 \left(\frac{T}{T_{\text{обл}}}\right)^{-2,2} \left[1 - \exp\left(-0,47 \frac{D}{D_0}\right)\right]^{0,5}, \quad (3)$$

где $T_{\text{обл}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; $D_0 = 4,55 \text{ с.н.а.}$

Так, при выходе реактора на режим, когда накопленная доза облучения еще пренебрежимо мала, предел текучести материала падает (рис. 9). Вместе с тем повышается напряженное состояние, что приводит к зарождению пластической области в выгородке (рис. 10). На этом этапе значение предела текучести полностью определяют два первых слагаемых из зависимости (3).

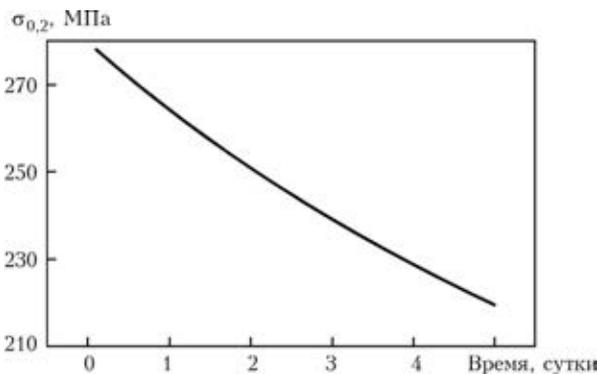


Рис. 9. Падение предела текучести при разогреве выгородки в процессе выхода на рабочий режим (в зоне максимальной температуры)

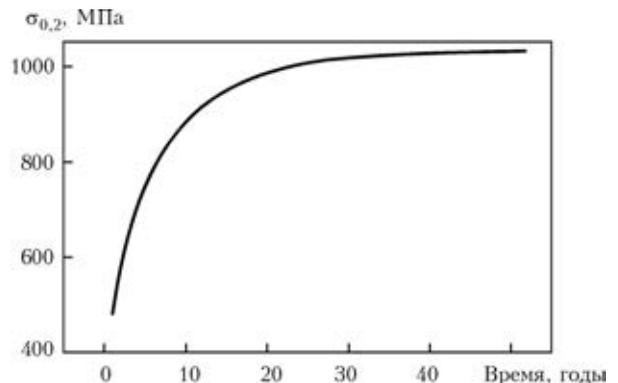


Рис. 11. Увеличение предела текучести при накоплении дозы облучения в процессе эксплуатации выгородки (в зоне максимума накопленной повреждающей дозы)

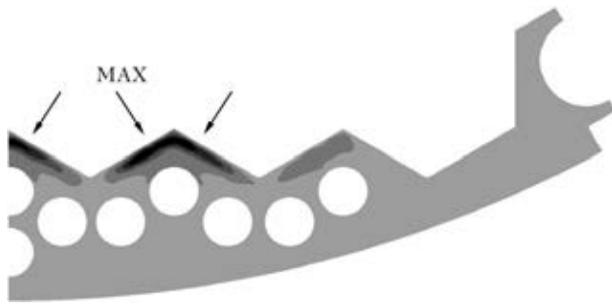


Рис. 12. Общая картина объемных деформаций распухания в выгородке в течение всего срока эксплуатации реактора

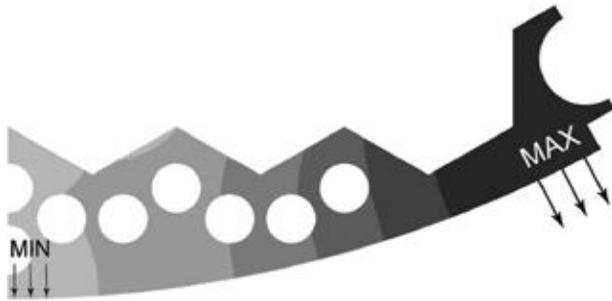


Рис. 13. Области максимального и минимального прироста радиуса в выгородке в процессе эксплуатации

С увеличением накопленной дозы облучения повышается и влияние третьего слагаемого из зависимости (3) на предел текучести. Так, за первый год эксплуатации реактора предел текучести материала выгородки вырос от 220 МПа в области максимума температуры до 480 МПа в области максимума накопленной повреждающей дозы (рис. 11).

Общая картина объемных деформаций распухания в выгородке в течение всего срока эксплуатации реактора сохраняется приблизительно одинаковой (рис. 12), но абсолютная величина распухания увеличивается. После 25 лет эксплуатации реактора максимальное значение деформаций распухания составляет 1,3, после 40 лет — 1,8, после 60 лет — 3,7 %.

Из-за неравномерности прогрева и распухания радиальные деформации в выгородке не одинаковы. Прирост радиуса максимален в области большого канала 9, а минимален в области канала № 1 (рис. 13). Их различие заметно уже при выходе реактора на режим полной мощности, даже когда значение распухания пренебрежимо мало. Прирост радиуса внешней поверхности выгородки при выходе реактора на режим всюду положителен, но при накоплении распухания внешняя поверхность выгородки в районе канала № 1 перемещается внутрь, в то время как радиус в районе большого канала продолжает расти.

Радиальные перемещения внешней поверхности выгородки после выхода реактора на режим нормальной эксплуатации составляют 11,2 мм для области max; 9,4 мм для области min. После 25 лет эксплуатации max(min) радиальные перемещения

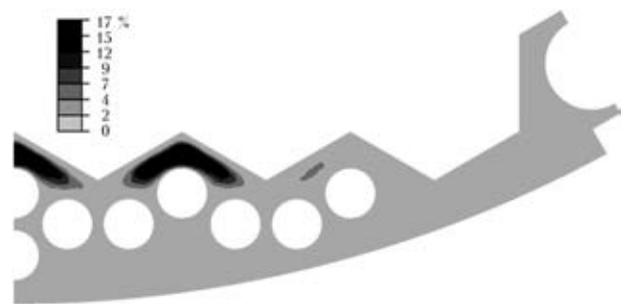


Рис. 14. Объемное распухание выгородки $\Delta V/V$ после 60 лет эксплуатации реактора по формуле (4)

составляют соответственно: 12,9 (8,8 мм); после 40 лет — 14,1 (7,9); после 60 — 16,1 (7,1).

Расчет объемных деформаций вследствие радиационного распухания в целом ряде существующих работ [1] предлагается проводить по следующей формуле:

$$S = \Delta V/V = 0,55(D + 0,1T - 67)\exp(-2,9 \cdot 10^{-4}(T - 485)^2), \quad (4)$$

где S — относительное радиационное распухание, %; $\Delta V/V$ — объемное распухание выгородки, %; D — повреждающая доза облучения, с.н.а.

Такая модель не учитывает напряженного состояния и это значит, что расчет не зависит от истории нагружения. Выражение $(D + 0,1T - 67)$ может принимать отрицательные значения, если доза облучения не достигла определенного значения, в этом случае значение распухания программно обнуляется. В соответствии с этой моделью распухание начинает возникать на 23-м году эксплуатации реактора, когда максимальное значение дозы в выгородке $D = 67 - 0,1T = 25$ с.н.а. Инкубационный период [9], в течение которого накопится эта доза, 23 года.

Оценка по распуханию согласно формуле (4) за 60 лет дает

$$S = 0,55(65,5 + 490/10 - 67)\exp[-2,9 \cdot 10^{-4}(490 - 485)^2] = 0,55 \cdot 47,5 \exp(-7,25 \cdot 10^{-3}) = 26 \%$$

Программный расчет по формуле (4) дает 17 %. Результат расчетов приведен на рис. 14.

Расчет объемных деформаций за 60 лет эксплуатации реактора, выполненный в данной работе по уточненной модели (формулы (2) и (3)) с учетом НДС, дает не 26 %, а значительно более низкое значение — 3,7 %. Таким образом, учет истории нагружения (напряженного состояния) при оценке радиационного распухания материала выгородки и ее радиальных деформаций существенно влияет на точность результатов.

Результаты по распуханию и радиальным деформациям выгородки, полученные с учетом напряженного состояния, свидетельствуют о возможном контакте выгородки со сварной стенкой шахты в течение эксплуатации реактора, началь-



ный минимальный зазор между которыми составляет 2,5 мм. Такой контакт может существенно повлиять на НДС сварной конструкции шахты, поэтому требует более детального изучения и создания трехмерной модели радиационного распухания и контактного взаимодействия выгордки и стенки шахты с учетом распределения дозы облучения и подогревов по высоте конструкций.

1. *Дополнительные работы по оценке технического состояния элементов реактора энергоблока № 1 ОП Южно-Украинской АЭС (этап № 6). Оценка радиационного распухания выгордки / В. Пишгора, С. Вандлик, Д. Лаурова, И. Андел: (Отчет) / ИЯИ. — Ржеж, 2011. — 81 с.*
2. *Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении, влияние различных факторов / И. П. Курсевич, Б. З. Марголин, О. Ю. Прокошев, В. И. Кононов // Вопр. материаловедения. — 2006. — 48, № 4. — С. 55–68.*
3. *Микроструктурные механизмы низкотемпературного радиационного распухания и охрупчивания материалов внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000 / О. В. Бородин, В. В. Брык, В. Н. Воеводин и др. // Проблемы ресурса і безпеки експлуатації конструкцій, споруд*

- і машин / За ред. Б. Є. Патона. — К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. — С. 161–166.*
4. *Гойна А. Определение текущих значений механических свойств элементов внутрикорпусных устройств: (Отчет) / ИЯИ. — № 02-2007 от 01.02.2008 (этап 5.2.1 ч. 2). — Ржеж, 2011.*
5. *Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР / Н. В. Шарый, В. П. Семишкин, В. А. Пиминов, Ю. Г. Драгунов. — М.: ИздАТ, 2004. — 496 с.*
6. *Махненко В.И. Расчетные методы исследований кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 317 с.*
7. *Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении, влияние различных факторов. Ч. II. Физические и механические закономерности охрупчивания / И. П. Курсевич, Б. З. Марголин, О. Ю. Прокошев, В. И. Кононов // Вопр. материаловедения. — 2006. — 48, № 4. — С. 99–111.*
8. *Радиационное распухание аустенитных сталей. Влияние различных факторов, обработка экспериментальных данных и формулировка определяющих уравнений / Н. К. Васина, Б. З. Марголин, А. Г. Гуленко, И. П. Курсевич // Там же. — С. 69–89.*
9. *Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Островский З. Е. Облученные нержавеющей стали. — М.: Наука, 1987. — 128 с.*

Поступила в редакцию 10.09.2012

СВАРКА И РЕЗКА-2013

13-я Международная специализированная выставка

09–12 апреля 2013 г.

ЗАО «МинскЭкспо»,
Республика Беларусь

При поддержке: Национальной академии наук Беларуси, Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии, ОХП «Институт сварки и защитных покрытий»

Тематика:

- материалы для сварки, наплавки и пайки
- оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварки и резка
- автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- научное и информационное обеспечение сварки
- система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- сертификация сварочного оборудования

Международная специализированная выставка «Сварка и Резка» будет проходить одновременно с выставками «Защита от коррозии. Покрытия».

Контакты: E-mail: e_federova@solo.by (Федорова Елена Владимировна).



УДК 621.791.92.042

РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ФЕРРИТНОГО КЛАССА ДЛЯ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Я. П. ЧЕРНЯК

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время остро стоит вопрос восстановления деталей с содержанием углерода более 0,5 %. Традиционные методы борьбы с трещинами, такие как предварительный и сопутствующий подогрев при наплавке деталей из высокоуглеродистых сталей, не всегда осуществимы в связи с большой массой деталей или экономической нецелесообразностью. Результаты исследований, представленные в статье, позволили разработать новый наплавочный материал ферритного класса, позволяющий без предварительного и сопутствующего подогрева получать бездефектный наплавленный слой. Основным элементом системы легирования Fe–Ti–Mn–Si–Mo является титан, что позволяло, учитывая его сродство к углероду и их стехиометрическое соотношение, получать мягкую ферритную матрицу в наплавленном металле при содержании углерода в основном металле до 1 %. Положительный результат опытно-промышленной проверки разработанной порошковой проволоки при наплавке трамвайных рельсов, которые изготавливаются из стали М76 с содержанием углерода до 0,8 %, позволил рекомендовать данную проволоку для применения в промышленности. Разработаны Технические условия Украины ТУУ 28.7.05416923.066–2002 на проволоку ПП-Нп-ОбТЗГМ (ПП-АН203) для ее производства в промышленных масштабах. Порошковая проволока ферритного класса ПП-Нп-ТЗСГМ обеспечивает отсутствие в наплавленном металле и ЗТВ трещин всех видов, в том числе и отколов, в широком диапазоне режимов наплавки. Она рекомендована для применения при наплавке деталей из высокоуглеродистых сталей без предварительного и сопутствующего подогрева. Библиогр. 4, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: дуговая наплавка, наплавочные материалы, высокоуглеродистые стали, порошковая проволока, ферритный наплавленный металл, предварительный и сопутствующий подогрев

Из высокоуглеродистых сталей, содержащих более 0,5 % углерода, изготавливают многие детали металлургического оборудования, железнодорожного транспорта, строительной техники и т. д. При наплавке этих деталей необходимо принимать меры для предотвращения образования холодных трещин в наплавленном металле и ЗТВ. Самым распространенным методом предотвращения трещин остается предварительный и сопутствующий подогрев и последующий отпуск, позволяющие значительно понизить остаточные наплавочные напряжения вследствие образования мартенситной структуры в наплавленном металле и ЗТВ. Если подогрев невозможен, то для наплавки используют аустенитные электродные материалы, что не всегда оправдано как с технической, так и экономической точек зрения [1].

Целью настоящей работы являлась разработка расходного материала для наплавки деталей из высокоуглеродистых сталей без или с минимальным подогревом, обеспечивающего получение бездефектного наплавленного металла, соответствующего по структуре легированной стали ферритного класса [2]. Для исключения образования мартенсита углерод, переходящий в наплавленный металл из основного металла, связывают в

прочные карбиды в таком соотношении, что в матрице он остается в минимальном количестве. В этом случае матрица сохраняет относительно мягкую и пластичную ферритную структуру. При этом наплавленный и основной металл имеют близкие коэффициенты термического расширения, что способствует снижению остаточных наплавочных напряжений.

Для проведения исследований выбрана система легирования наплавленного металла Fe–Ti–Mn–Si–Mo. Содержание титана в наплавленном металле выбирали из следующих соображений. Известно, что титан энергично реагирует с углеродом и образует с ним карбид TiC со стехиометрическим соотношением 4:1. Наплавку планировали проводить на сталь, содержащую 0,7...0,9 % углерода. При проплавлении основного металла равном примерно 30...40 % содержание углерода в первом наплавленном слое может достигать 0,35 %. Чтобы связать такое количество углерода, необходимо около 2 % титана, что должно обеспечить образование мягкой ферритной матрицы и, как следствие, отсутствие трещин в наплавленном металле.

Известно также, что титан сильно окисляется в процессе наплавки и для определения его необходимого содержания в наплавленном слое и соответственно в шихте порошковой проволоки



Таблица 1. Содержание титана в металле первого наплавленного слоя в зависимости от его количества в шихте самозащитной порошковой проволоки

Расчетное содержание титана в шихте порошковой проволоки, мас. %	Фактическое содержание титана в наплавленном металле, мас. %
2,17	0,68
3,26	1,15
3,95	1,31
4,05	1,51
4,87	2,05
5,62	2,50
7,04	2,73

провели опыты по наплавке образцов из высокоуглеродистой стали, содержащей 0,8 % углерода, самозащитной проволокой исследуемой системы легирования диаметром 2,6 мм. Наплавку вели открытой дугой на режиме: $I = 430...450$ А; $U = 24...26$ В; $v_n = 36,8$ м/ч. Применяли газослаковую систему основного типа ($CaF_2 + CaCO_3 + [SiO_2 + K_2O + Al_2O_3]$). Титан вводили в виде ферротитана ФТи-70 с 69 % Ti.

По данным табл. 1, в которой представлены результаты исследований, был рассчитан средний коэффициент перехода титана в металл первого наплавленного слоя, который составил около 40 %. Таким образом, чтобы обеспечить требуемое количество титана в первом наплавленном слое равное 2 % его содержание в шихте порошковой проволоки должно быть около 5 %.

В соответствии с данными по переходу титана в наплавленный металл для проведения исследований изготовили опытную порошковую проволоку ПП-Нп-ТЗСГМ и провели наплавку на сталь, содержащую 0,8 % углерода, на режиме, приведенном выше. Результаты исследования химического состава и твердости наплавленного металла первого и третьего валиков приведены в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав и твердость металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-ТЗСГМ

Номер валика	Массовая доля элементов, %							Твердость HV
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	
1	0,4	0,9	0,9	—	—	2,6	0,4	185...195
3	0,2	1,0	1,2	—	—	3,3	0,6	170...180

Металлографический анализ показал, что структура металла первого – третьего валика ферритная (рис. 1). Характерной особенностью ее является наличие дезориентированных мелких кристаллитов, по границам и внутри которых выпали дисперсные включения, представляющие в основном карбонитриды различного состава. Низкая твердость (HV 170...195) также свидетельствует об отсутствии мартенсита в матрице наплавленного металла первого – третьего валиков.

С помощью быстродействующего dilatометра конструкции ИЭС им. Е. О. Патона [3, 4] изучали структурные и фазовые превращения в наплавленном металле в процессе нагрева и охлаждения. В быстродействующем dilatометре скорости нагрева и охлаждения образцов имитируют термические циклы наплавки (сварки). Образцы изготавливали из металла первого слоя, наплавленного порошковой ПП-Нп-ТЗСГМ металла на сталь, которая содержит 0,8 % углерода (табл. 2).

Как видно из рис. 2, а, образцы в процессе охлаждения со скоростью 36 °С/с (в соответствии с наиболее жестким наплавочным термическим циклом) сохраняют исходную ферритную структуру. Об этом свидетельствует монотонность и обратимость кривых.

Полученные кривые сравнивали с dilatограммой трансформаторного железа, содержащего 4...5 % кремния и имеющего устойчивую структуру феррита (ОЦК-решетку) в интервале от комнатной температуры до температуры плавления (рис. 2, б). Из сравнения dilatограмм наплавленного металла ТЗСГМ и трансформаторного же-

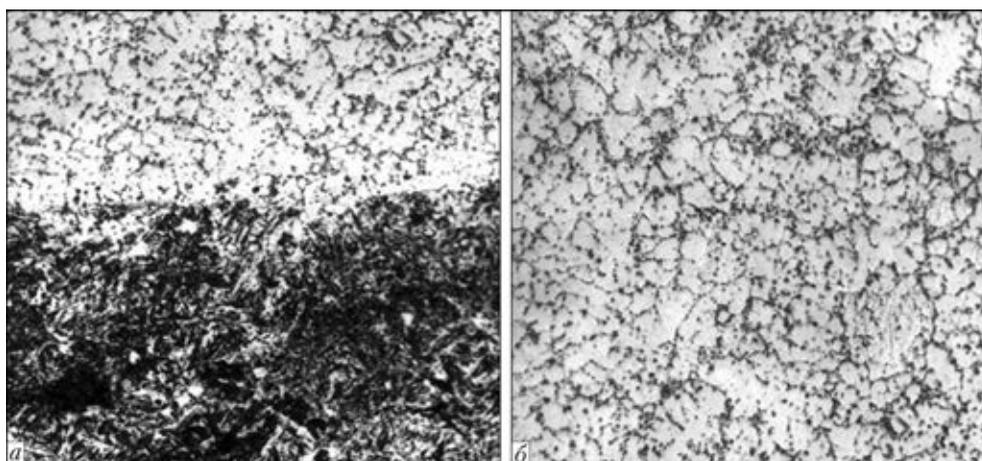


Рис. 1. Микроструктура (×500) металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-ТЗСГМ: а — зона сплавления; б — центр первого валика

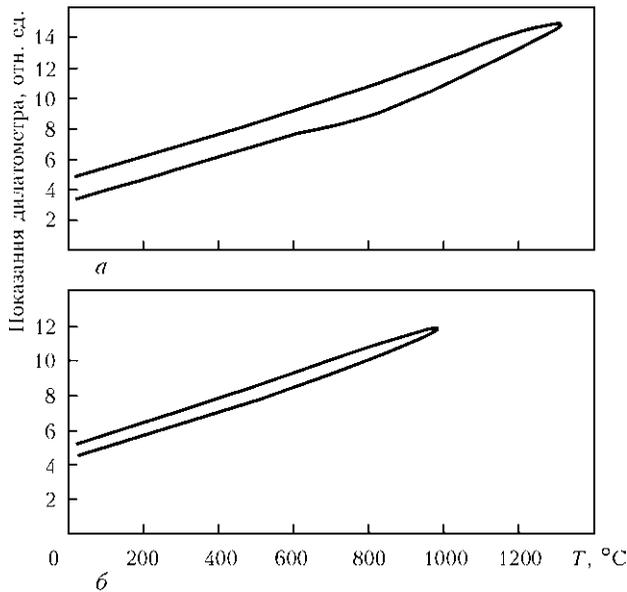


Рис. 2. Дилатометрические кривые нагрева и охлаждения наплавленного металла ТЗСГМ (а) и трансформаторного железа (б)

леза видно, что они подобны и имеют одинаковый наклон, т. е. их структуры и коэффициенты термического расширения близки.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что даже при содержании в наплавленном металле до 0,5 % углерода за счет легирования титаном этот металл кристаллизуется как ферритный и не претерпевает никаких превращений в твердом состоянии.

Исследование механических свойств металла, наплавленного проволокой ПП-НпТЗСГМ, свидетельствует о достаточно высоком их уровне: $\sigma_T = 393$ МПа; $\sigma_B = 638$ МПа; $\delta = 18,5$ %; $\psi = 24,5$ %.

Проведена опытно-промышленная проверка разработанной порошковой проволоки, содержащей до 0,8 % углерода, при наплавке трамвайных рельсов, изготовленных из стали М76.

Измерение твердости металла ЗТВ показало, что у границы сплавления под первым наплавленным валиком максимальная твердость составляет около HV 400 (рис. 3). Микроструктура в этой зоне — отпущенный мартенсит + бейнит (см. рис. 1, а). Примечательно, что карбидная гряда на границе сплавления практически полностью отсутствует. Остальные участки ЗТВ имеют ферритно-перлитную структуру с твердостью HV

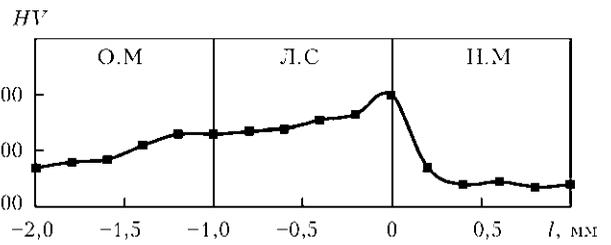


Рис. 3. Твердость зоны сплавления под первым наплавленным валиком

280...350 и не представляют опасности с точки зрения образования холодных трещин.

Результаты опытно-промышленной проверки показали, что разработанная порошковая проволока ПП-Нп-ТЗСГМ обеспечивает в широком диапазоне режимов наплавки отсутствие в наплавленном металле и металле ЗТВ трещин всех видов, в том числе и отколов. Еще одним достоинством порошковой проволоки ПП-Нп-ТЗСГМ является отсутствие дефицитных и дорогостоящих легирующих элементов, поэтому цена ее невысока.

Выводы

1. Разработана порошковая проволока ПП-Нп-ТЗСГМ, обеспечивающая при наплавке деталей из высокоуглеродистых сталей без подогрева получение пластичной ферритной структуры наплавленного металла и, как следствие, отсутствие холодных трещин.
2. Проведенные исследования и опытно-промышленная проверка позволяют рекомендовать порошковую проволоку ПП-Нп-ТЗСГМ для наплавки деталей из высокоуглеродистых сталей без предварительного и сопутствующего подогревов.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
2. Черняк Я. П., Бурский Г. В., Каленский В. К. Сопrotивляемость металла ЗТВ стали М76 образованию холодных трещин после наплавки проволоками ферритного класса // Автомат. сварка. — 2002. — № 11. — С. 53–54.
3. Васильев В. Г., Малевский Ю. Б. Дилатометр для исследования фазовых превращений при сварочном термическом цикле // Физические методы исследования металлов. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 144–148.
4. Васильев В. Г., Малевский Ю. В. Дилатометр для измерения удлинения в поперечном сечении образца // Машины и приспособления для испытания металлов и пластмасс. — М.: Mashgiz, 1965. — С. 122–128.

Поступила в редакцию 11.07.2012



АЛГОРИТМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ МИГ/МАГ ИЗДЕЛИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ШИРИНОЙ РАЗДЕЛКИ КРОМОК

Т. Г. СКУБА, В. В. ДОЛИНЕНКО, В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Область исследований — автоматизация процессов многопроходной сварки МИГ/МАГ толстостенных изделий в нижнем положении. Цель исследований — получение сварного шва заданной ширины и усиления, не имеющего непроваров и подрезов при наличии внешних возмущающих воздействий в виде изменений геометрических параметров разделки кромок стыка (выборки). Задача исследований — разработка алгоритма технологической адаптации, который обеспечивает заданную высоту свариваемого слоя. Методика исследований — синтез математической модели на базе уравнений, содержащих как феноменологические описания процессов, так и регрессионные зависимости. Предложен алгоритм технологической адаптации разделки кромок стыка на базе средств технического зрения для многопроходной сварки МИГ/МАГ. Алгоритм обеспечивает в режиме реального масштаба времени на основе текущих геометрических параметров разделки кромок, расчет режима автоматической сварки (напряжения, тока и скорости сварки). В алгоритме используется разработанная математическая модель «источник питания – дуга установившегося процесса сварки МИГ/МАГ». Для проверки алгоритма выполнены сварочные эксперименты, в которых на стальную пластину наплавляли слой металла постоянной толщины 0,2 см с изменяющейся при этом шириной 2,0...3,3 см. Диапазон изменения погонной энергии сварки — 4,0...8,5 кДж/см, частота коротких замыканий — 5...54 Гц. Обрывов дуги не наблюдалось, дефекты макроструктуры наплавленного слоя отсутствовали. Предлагаемый алгоритм технологической адаптации можно рекомендовать к применению в АСУТП многопроходной сварки. Библиогр. 21, рис. 8.

Ключевые слова: многопроходная сварка МИГ/МАГ, технологическая адаптация, слой постоянной высоты, математическая модель, режим сварки

Многопроходная сварка МИГ/МАГ применяется при изготовлении и ремонте конструкций ответственных изделий с целью обеспечения высокого качества сварных соединений [1–5]. Применение роботизированной сварки с использованием средств технического зрения [6] позволяет обеспечить стабильность и повторяемость качества формирования сварного соединения, так как устраняет субъективный фактор — квалификацию сварщика. Одной из задач технологической адаптации многослойной роботизированной сварки является получение качественного сварного шва с требуемым усилением при максимально возможной производительности. Решением поставленной задачи является разработка алгоритма технологической адаптации, который на основе текущих геометрических параметров разделки позволял бы формировать вектор параметров оптимального режима автоматической сварки: напряжение, ток и скорость сварки. Известны методики решения этой задачи на основе полнофакторных активных экспериментов. Например, в работах [7, 8] синтезируются регрессионные модели, которые ис-

пользуются для формирования оптимального управления процессом сварки.

В настоящее время созданию систем адаптивного управления сваркой МИГ/МАГ уделяется большое внимание за рубежом [9–12]. Однако в полной мере задача обеспечения оптимального режима многопроходной сварки не решена.

В данной статье рассмотрена разработка алгоритма технологической адаптации для роботизированной многопроходной сварки МИГ/МАГ массивных изделий в нижнем положении.

Рассмотрим многопроходную дуговую сварку, при которой заполняется V-образная разделка (рис. 1, а) или выборка в изделии (рис. 1, б) слоями одинаковой высоты.

Первым этапом технологической адаптации является сканирование разделки (выборки) лазерным триангуляционным сенсором (ЛТС). По результатам сканирования делается вывод — геометрические параметры разделки остаются постоянными либо изменяются на всем ее протяжении.

В первом случае при постоянной геометрии разделки (выборки) технологическая адаптация

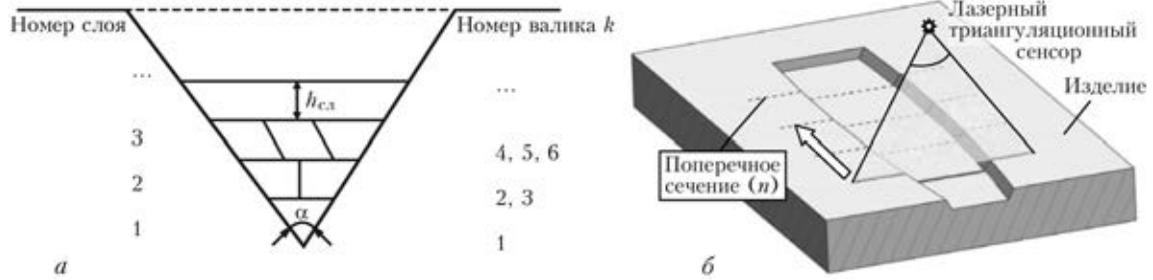


Рис. 1. Схемы многопроходной сварки: *a* — заполнение V-образной разделки слоями постоянной высоты (α — угол разделки; $h_{сл}$ — высота слоя, см); *б* — заполнение выборки в изделии (продольными сварными швами)

для многопроходной сварки МИГ/МАГ связана с наплавкой валиков на разных n -х слоях (рис. 1, *a*) и состоит в расчете режима наплавки для каждого k -го валика. Параметры режима наплавки остаются постоянными по всей длине наплавляемого валика.

Во втором случае при переменной геометрии разделки технологическая адаптация может быть связана, например, с изменением угла разделки вдоль линии стыка (рис. 1, *a*) или с изменяющейся формой выборки (рис. 1, *б*). Для компенсации указанных возмущений необходимо управлять режимом сварки в процессе наплавки каждого k -го валика. Таким образом, при укладке слоя постоянной высоты в разделку с изменяющейся шириной необходимо постоянно регулировать поперечное сечение каждого валика в слое в реальном масштабе времени.

Формулирование концепции технологической адаптации для многослойной многопроходной сварки. Рассмотрим n -е поперечное сечение наплавляемого слоя (рис. 1, *б*), которое имеет форму трапеции (в общем случае трапеция не является равнобедренной) с площадью $S_n[n]$ (рис. 2).

Площадь поперечного сечения $S_n[n]$ рассчитываем по формуле

$$S_n[n] = l_n[n]h_{сл} + \frac{h_{сл}^2}{2}(\text{tg } \theta_n[n] + \text{tg } \theta_n[n]), \quad (1)$$

где $l_n[n]$ — ширина нижней поверхности слоя, см; $\theta_n[n]$, $\theta_n[n]$ — угол наклона поверхности левой и правой кромки, град.

Наплавляемый слой состоит из целого количества валиков N , площади поперечного сечения которых $F_n[k]$ для каждого $S_n[n]$ имеют одинаковые значения:

$$F_n[k] = \frac{S_n[n]}{N}, \quad (2)$$

где k — номер валика.

Ширину валика $E[k]$ рассчитываем по следующей формуле:

$$E[k] = \frac{l_n[k]}{(N - 2K_{б.к} - (N - 1)K_{с.в})}, \quad (3)$$

где $K_{б.к}$ — коэффициент, определяющий величину перекрытия крайних в слое валиков с боковыми кромками изделия; $K_{с.в}$ — коэффициент, определяющий величину перекрытия между соседними валиками в слое. Здесь $K_{б.к} = 0,135$ и $K_{с.в} = 0,27$.

Целью данной работы является разработка такого алгоритма адаптивного управления сваркой, который для каждого $E[k]$ и $F_n[k]$ позволяет рассчитать параметры режима сварки МИГ/МАГ: напряжение U , ток I и скорость сварки $v_{св}$.

В первой части алгоритма технологической адаптации для расчетных значений ширины валика $E[k]$ определяют требуемые значения погонной энергии. Рассмотрим случай наплавки валика на поверхность массивного тела. Ширину зоны на поверхности изделия, ограниченной изотермами температуры плавления $T_{пл}$, можно определить из следующего уравнения [13]:

$$E[k] = \sqrt{\frac{8q_n[k]}{\pi c \gamma \Delta T}}, \quad (4)$$

где $q_n[k]$ — погонная энергия сварки, Дж/см; $c \gamma$ — объемная теплоемкость, Дж/(см³·°C); $\Delta T = (T_{пл} - T_0)$, °C; $T_{пл}$ — температура плавления стали, °C; T_0 — начальная температура изделия, °C; π , e — константы ($\pi = 3,14159265$, $e = 2,71828183$).

Расчеты по формуле (4) позволяют получать значения погонной энергии с погрешностью более 8 % [14], что для поставленной задачи неприемлемо. При известном подходе можно повысить точность расчетов путем введения дополнительного коэффициента [15]. Экспериментально для диапазона изменений погонной энергии 4200...8400 Дж/см получен поправочный коэффициент K_q , который уменьшает погрешность рас-

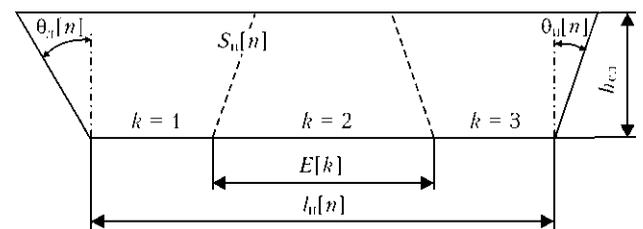


Рис. 2. Схема n -го поперечного сечения наплавляемого слоя



четов до 5 %. Тогда уравнение (4) запишется следующим образом:

$$q_n[k] = K_q \frac{\pi e}{8} E[k]^2 c \gamma \Delta T, \quad (5)$$

где $q_n[k]$ — экспериментальные данные погонной энергии сварки, Дж/см; $K_q = 1,05 - 0,6 \cdot 10^{-4} q_n$. После их подстановки уравнение (5) принимает вид

$$q_n[k] \cong \frac{1,121 E[k]^2 c \gamma \Delta T}{1 + 6,405 \cdot 10^{-5} E[k]^2 c \gamma \Delta T} \quad (6)$$

Вторая часть алгоритма технологической адаптации — это решение системы феноменологических и регрессионных уравнений, описывающих сварку МИГ/МАГ в установившемся состоянии. Входными данными являются ширина валика $E[k]$, площадь поперечного сечения наплавляемого валика $F_n[k]$ и погонная энергия сварки $q_n[k]$:

$$q_n[k] = \frac{I[k] U[k] \eta_3}{v_{cb}[k]}, \quad (7)$$

$$I[k] = (86,58 + 18,94 v_{nп}[k] - 4,2 U[k] + 0,17 U v_{nп}[k] - 0,46 v_{nп}[k]^2 + 0,09 U[k]^2), \quad (8)$$

$$F_n[k] = \frac{\pi d_3^2 v_{nп}[k] (1 - \psi)}{4 v_{cb}[k]}, \quad (9)$$

$$v_{nп}[k] = \frac{K[k] U[k] j_3[k] + 10^4 \rho_3 j_3[k]^2 L_3[k]}{M}, \quad (10)$$

$$K[k] = (0,285 - 0,0052 U[k]), \quad (11)$$

$$j_3[k] = \frac{4 I[k]}{\pi d_3^2}, \quad (12)$$

$$v_{nп}[k] = v_{nп}[k], \quad (13)$$

где L_3 — длина вылета электрода, см; $v_{nп}$ — скорость подачи проволоки, см/с; $v_{пл}$ — среднее интегральное значение скорости плавления электродной проволоки, см/с; K — коэффициент, определяющий затраты тепла на нагрев и плавление проволоки, $1/\text{см}^2$; M — теплофизическая константа электродной проволоки, Дж/см³; d_3 — диаметр электрода, равный 0,12 см; j_3 — плотность тока электродной проволоки, А/см²; ρ_3 — среднее значение удельного электросопротивления электродного металла, Ом/см; η_3 — эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой; ψ — коэффициент, учитывающий потери присадочного металла на разбрызгивание и угар.

Значение $q_n[k]$ определяется по формуле (7) [16]. Уравнение (8) является регрессионным и позволяет рассчитать скорость подачи электродной

проволоки. Оно синтезировано авторами для режима сварки МИГ/МАГ со следующими значениями: источник питания дуги «Fronius TransPuls Synergic-5000» на обратной полярности, в среде защитного газа 82 % Ar + 18 % CO₂, диаметр электрода 0,12 см, диапазон тока сварки 200...300 А и напряжений сварки 22...30 В. Значение площади сечения наплавленного валика рассчитывается из уравнения (7) [1]. Скорость плавления проволоки рассчитывается из уравнений (10), (11) для установившегося режима сварки МИГ/МАГ при изменении напряжения сварки в диапазоне 15...35 В [17]. Из уравнения (12) рассчитывается плотность тока в круглом проводнике. Уравнение (13) описывает устойчивость процесса каплепереноса в системе источник питания — дуга при сварке МИГ/МАГ.

Решение системы уравнений (7)–(13) позволяет получить требуемые значения скорости подачи проволоки $v_{nп}[k]$, напряжения сварки $U[k]$ и скорости сварки $v_{cb}[k]$ для k -го сечения текущего валика многопроходного шва.

Исследование системы уравнений (6)–(13) показывает, что во многих случаях нельзя получить единственное решение. Поэтому целесообразно применить метод поиска численного решения по критерию минимальной среднеквадратичной ошибки. С этой целью сформированы дополнительные условия, которые, во-первых, обеспечивают устойчивый режим сварки МИГ/МАГ [18]; во-вторых, минимизируют среднеквадратические погрешности решения; в-третьих, обеспечивают максимальную производительность процесса сварки. В результате составлена следующая система неравенств, которая задает ограничения для алгоритма поиска решения системы уравнений (6)–(13):

$$I_{\min} < I[k] < I_{\max}, \quad (14)$$

$$A_3 I[k] < U[k] < A_4 I[k], \quad (15)$$

$$\delta_{F_n[k]} = \sqrt{\left(\frac{F_n[k] - \pi(d_3)^2 v_{nп}[k] (1 - \psi)}{4 v_{cb}[k]} \right)^2} < \delta_{F_{n\max}}, \quad (16)$$

$$\delta_{v_{nп}[k]} = \sqrt{\left(\frac{v_{nп}[k] - v_{nп}[k]}{v_{nп}[k]} \right)^2} < \delta_{v_{nп\max}}, \quad (17)$$

$$v_{cb}[k] > v_{cb\min} \quad (18)$$

где I_{\min} , I_{\max} — значения верхнего и нижнего предела для тока сварки; A_3 , A_4 — коэффициенты, задающие ограничения для напряжения сварки, которые обеспечивают устойчивый режим сварки



МИГ/МАГ в выбранном диапазоне токов сварки [18, 19]; δ_{F_n} , $\delta_{v_{п.п}}$ — относительная фактическая и максимально допустимая погрешность между расчетным значением сечения наплавки и заданным; $\delta_{v_{п.п}}$, $\delta_{v_{п.п \max}}$ — относительное фактическое и максимально допустимое отклонение расчетного значения скорости подачи проволоки относительно скорости ее плавления; $v_{св \min}$ — минимальное значение скорости сварки, при котором обеспечивается необходимый уровень рентабельности при применении автоматической многопроходной сварки.

Для совместного решения системы уравнений (6)...(13) и ограничений (14)...(18) использовали нелинейные методы поиска локальных экстремумов такие, как алгоритм Левенберга–Марквардта, метод сопряженных градиентов или квазиньютоновские методы [20]. Проверку математической модели и алгоритмов ее решения выполняли в математическом пакете Mathcad с использованием оператора «Minerr» [21], который позволяет задать один из трех методов решения: «Levenberg-Marquardt», «Conjugate Gradient» или «Quasi-Newton».

В качестве примера решена задача наплавки слоя высотой 0,2 см с изменяющейся шириной от 2,0 до 3,3 см на пластину углеродистой стали толщиной 1,2 см. Материал электродной проволоки Св-08Г2С-О. Геометрические параметры $S_n[n]$ рассчитаны с интервалом 3 см по формуле (1) на основе геометрических характеристик проекций лазерной плоскости на разделку свариваемого изделия, полученных с помощью ЛТС. В итоге геометрическая модель изменения поперечного сечения слоя представляет собой кривую, состоящую из отрезков прямых, соединяющих соседние точки расчетных значений $S_n[n]$, где $n = 1 \dots 8$, в зависимости от продольной координаты x (рис. 3).

Отметим, что для обеспечения корректного выполнения технологических операций «поджиг

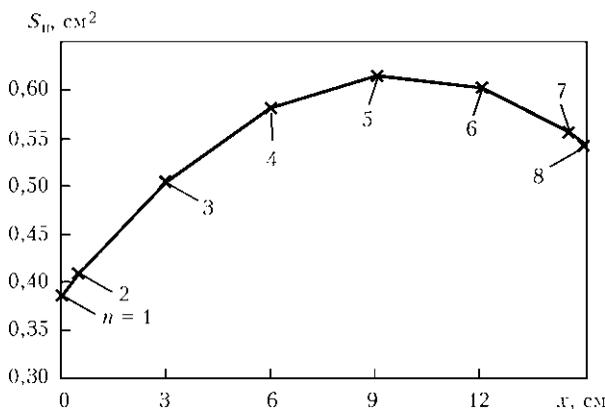


Рис. 3. Кривая изменения поперечного сечения наплавляемого слоя (использована линейная интерполяция между расчетными точками)

дуги» и «заварка кратера» специально добавлены две точки с номерами 2 и 7.

На основании общей геометрической модели многопроходного шва сформированы траектории перемещения горелки для сварки трех заполняющих валиков и двух вспомогательных (краевых), которые имитируют края выборки (рис. 4). Рассмотрение задачи расчета траекторий горелки для автоматической многопроходной сварки выходит за рамки данной статьи.

На основании результатов анализа минимального и максимального значений поперечных сечений слоя (рис. 3) и с учетом допустимого для разработанной математической модели диапазона погонной энергии 4200...8400 Дж/см рассчитаем необходимое количество валиков в слое $n = 3$. Принимаем, что площади поперечных сечений всех заполняющих валиков $F_n[k]$ в одном и том же сечении слоя одинаковы. Поэтому массив исходных значений поперечных сечений валиков следующий:

$$F_n[k] = (0,128; 0,136; 0,168; 0,194; 0,205; 0,201; 0,185; 0,181), \text{ см}^2. \quad (19)$$

Массив значений ширины валиков находим по формуле (3)

$$E[k] = (0,83; 0,88; 1,10; 1,27; 1,35; 1,32; 1,22; 1,18), \text{ см}. \quad (20)$$

Массив данных для погонной энергии сварки получаем по формуле (6)

$$q_n[k] = (4244, 4651, 6344, 7592, 8091, 7902, 7177, 6964), \text{ Дж/см}. \quad (21)$$

Расчет режимов сварки выполнен при следующих значениях теплофизических и технологических констант: $\eta_3 = 0,8$; $c\gamma = 4,9 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{°C})$;

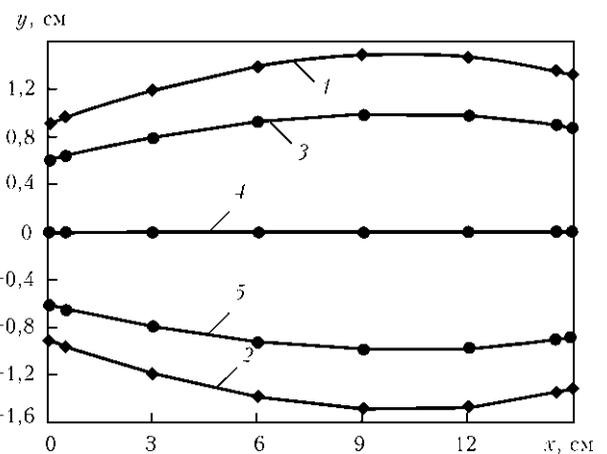


Рис. 4. Траектории перемещения горелки при наплавке слоя; x, y — координаты продольного и поперечного перемещения горелки; 1, 2 — вспомогательные крайние валики; 3–5 — основные заполняющие валики

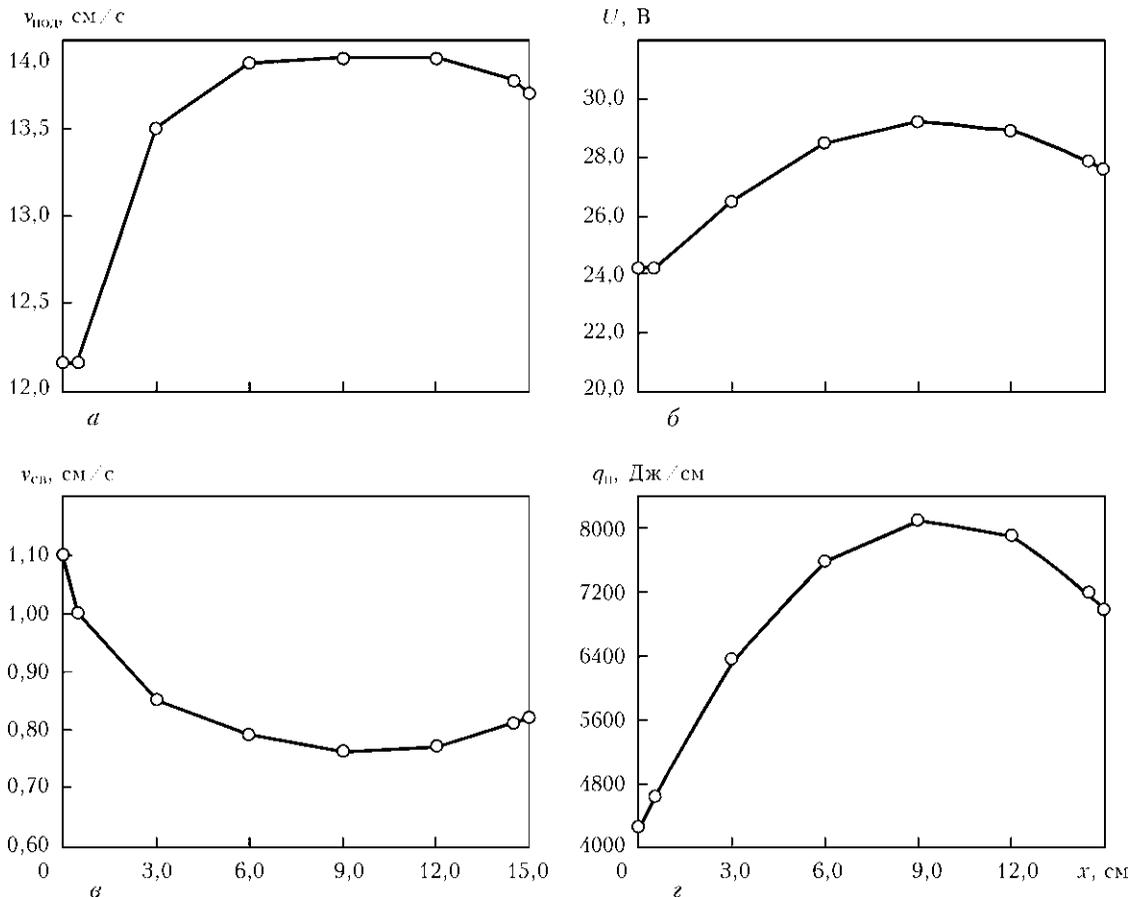


Рис. 5. Кривые изменения параметров режима сварки валиков (а–г) в шве при выполнении многопроходного слоя изменяющейся ширины

$\psi = 0,1$; $\rho_3 = 0,777 \cdot 10^{-6}$ Ом/см; $M = 9,75 \cdot 10^3$ Дж/см³; $T_{пл} = 1520$ °С; $T_0 = 200$ °С; $I_{min} = 195$ А; $I_{max} = 300$ А; $A_3 = 0,1$; $A_4 = 0,116$; $v_{св min} = 0,75$ см/с; $\delta_{F_n max} = 0,05$; $\delta_{v_{п.п max}} = 0,1$.

Для поиска решения использован пакет Mathcad. Применение метода «Levenberg-Marquardt» к системе уравнений (7)–(13) с ограничениями (14)–(18) позволило получить следующие значения параметров режимов многопроходной сварки:

$$v_{под}[k] = (12,16; 12,16; 13,50; 13,87; 13,90; 13,90; 13,77; 13,70), \text{ см/с}, \quad (22)$$

$$U[k] = (24,2; 24,2; 26,5; 28,5; 29,2; 28,9; 27,9; 27,6), \text{ В}, \quad (23)$$

$$v_{св}[k] = (1,1; 1,0; 0,85; 0,79; 0,76; 0,77; 0,81; 0,82), \text{ см/с}, \quad (24)$$

$$\delta_{F_n p100} = (4,6; 3,4; -1,1; 2,1; 3,3; 2,8; 1,1; 0,6), \text{ \%}, \quad (25)$$

$$\delta_{v_{п.п}[k]} \cdot 100 = (8,0; 8,0; 11,5; 16,1; 17,5; 17,0; 14,8; 14,1), \text{ \%}. \quad (26)$$

При задании текущего режима сварки промежуточные значения для уставок параметров ре-

жима рассчитывали методом линейной интерполяции. Графики результирующих функций изображены на рис. 5 (график изменения q_n приведен для проверки расчетов).

Отметим, что расчет режимов сварки с использованием оператора Mathcad «Minerr» на ПЭВМ с процессором Intel Core(TM)2 Quad CPU 2.50GHz и объемом ОЗУ 2Гб длится менее 1 с. Поэтому такой подход может быть использован в системе адаптивного управления в реальном масштабе времени.

Анализ полученных решений для режимов многопроходной сварки показывает, что ожидаемые погрешности формирования валиков по таким параметрам, как сечение наплавки и ширина валиков не превышают 5 %, что гарантирует равномерную наплавку слоя. Рассогласование скоростей плавления и подачи электродной проволоки не превышает 20 %. Расчетные режимы многопроходной сварки МИГ/МАГ обеспечивают высокую производительность технологической операции наплавки слоя толщиной 0,2 см: скорость сварки варьируется от 0,76 до 1,1 см/с, а ток сварки — от 241 до 262 А.

Экспериментальная проверка алгоритма технологической адаптации. Для проверки расчетных режимов многопроходной сварки были



Рис. 6. Макрошлиф наплавленного слоя (заштрихованные области имитируют выборку в разрезе): 1, 2 — вспомогательные краевые валики; 3–5 — основные заполняющие валики

проведены эксперименты по наплавке на пластину низкоуглеродистой стали слоя толщиной 0,2 см. Наплавляемый слой состоял из пяти валиков: двух вспомогательных, которые имитируют края выборки, и трех заполняющих. Сварку производили в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO₂ (25 л/мин), $d_w = 0,12$ см, $L_w = 1,4$ см. Температуру

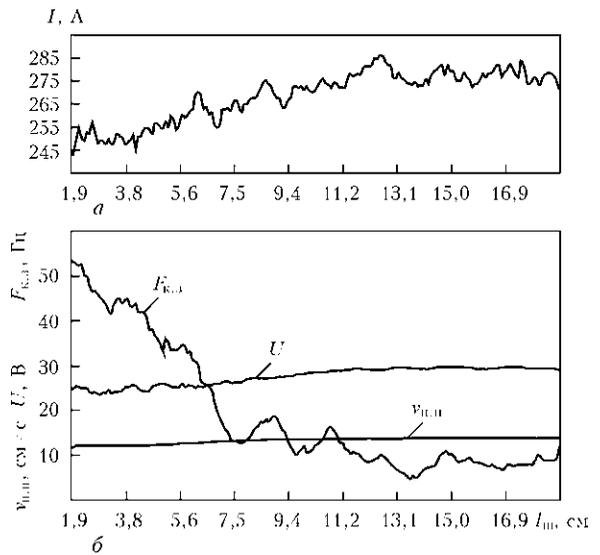


Рис. 7. Тренды изменения параметров режима сварки МИГ/МАГ при реализации алгоритма технологической адаптации (валик № 3): а — ток сварки I ; б — частота коротких замыканий дугового промежутка $F_{к.з}$, напряжение сварки U и скорость подачи проволоки $v_{п.п}$

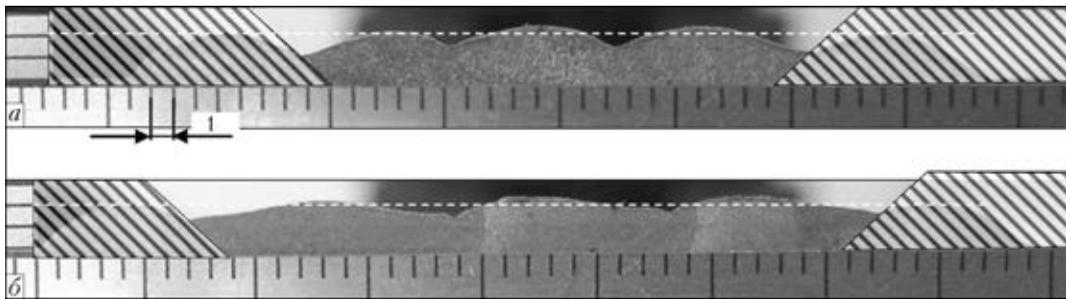


Рис. 8. Макрошлифы наплавленного слоя с использованием многопроходной сварки МИГ/МАГ (заштрихованные области имитируют выборку в разрезе): а — начальный участок слоя (сечение А–А рис. 6); б — конечный участок слоя (сечение В–В рис. 6)

изделия измеряли ТХА термопарами, что позволило контролировать температуру подогрева T_0 с помощью технологических остановок между наплавками валиков. Как видно из внешнего вида наплавленного слоя (рис. 6), величины перекрытий между валиками соответствуют заданным, а потери на угар и разбрызгивание удовлетворительные.

Выполнен анализ устойчивости процесса сварки на базе зарегистрированных и усредненных значений (трендов) U , I , $v_{п.п}$ и частоты коротких замыканий дугового промежутка $F_{к.з}$. На рис. 7 показаны тренды технологических параметров сварки валика № 3 по всей длине шва l_w (кроме интервалов «поджиг дуги» и «заварка кратера»). Анализ полученных трендов показывает, что фактические изменения параметров режима сварки соответствовали расчетным кривым изменений уставок (см. рис. 5). Процесс сварки МИГ/МАГ имел устойчивый характер. Параметр $F_{к.з}$ изменялся в диапазоне от 54 до 5 Гц, что соответствует допустимому при сварке МИГ/МАГ изменению

характера каплепереноса от мелко- к крупнокапельному. Обрывов дуги не наблюдалось.

Выполнен анализ макрошлифа наплавленного слоя (рис. 8), показавший хорошее качество наплавленного слоя, в котором отсутствовали шлаковые включения и поры. Погрешности по ширине и высоте полученного слоя не превышают 5 %. Высота слоя (штриховая линия на рис. 8) остается постоянной на всем его протяжении.

Результаты экспериментальной проверки разработанного алгоритма технологической адаптации показывают, что предложенный алгоритм управления режимами сварки по I , U и $v_{св}$ позволяет получить слой заданной ширины и высоты с отсутствием дефектов. Высокая скорость расчета режимов сварки позволяет применять разработанный алгоритм в системах технологической адаптации для роботизированной многопроходной сварки МИГ/МАГ изделий большой толщины с переменной шириной разделки кромок.



1. *Березовский Б. М.* Математические модели дуговой сварки: В 3 т. Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. — Челябинск: ЮУрГУ, 2003. — 601 с.
2. *Разработка* высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / Н. Киндзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямяока // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 59–63.
3. *Дослідження* та розробка технології електродугового зварювання рейкових закінчень залізничних хрестовин стрілочних переводів / В. Д. Позняков, В. М. Кір'яков, О. А. Гайворонський та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, 2009. — С. 579–584.
4. *Ремонтная* сварка корпусных деталей турбин из теплоустойчивых сталей без последующей термообработки / А. К. Царюк, В. Д. Иваненко, В. В. Волков и др. // Там же. — 2009. — С. 519–524.
5. *Memhard D., Pfeiffer W., Siegele D.* Determination of residual stress in multipass weldments of high strength steels with experimental and numerical techniques // Intern. conf. «WELDS-2005», GKSS Research Centre Geesthacht, 8–9 Sept., 2005. — P. 1–14.
6. *Гладков Э. А.* Управление процессами и оборудованием при сварке: Учеб. пособие для вузов. — М.: Академия, 2006. — 429 с.
7. *Srimath N., Murugan N.* Prediction and optimisation of weld bead geometry of plasma transferred arc hardfaced valve seat rings // Europ. J. Sci. Res. — 2011. — 51, № 2. — P. 285–298.
8. *Choteborsky R., Navratilova M., Hrabe P.* Effects of MIG process parameters on the geometry and dilution of the bead in the automatic surfacing // Res. Agr. Eng. — 2011. — 57. — P. 56–62.
9. *Muligan S. J.* Development of laser vision-based adaptive control of robotic multipass MAG welding. — TWI Ltd., Granta Park, Great Abington Cambridge, May, 2007. — 49 p.
10. *Moon H. S., Beattie R. J.* A fully automated adaptive pressure vessel welding system // American Welding Society AWS conf., Orlando, Florida, 17–18 Sept., 2002. — P. 1–6.
11. *Moon H. S., Beattie R. J.* Development of adaptive fill control for multitorch multipass submerged arc welding // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2002. — P. 867–872.
12. *Lipnevicius G.* Robotic shop // Moder Steel Construction. — May, 2009. — P. 1–3.
13. *Бельчук Г. А., Гатовский К. М., Кох Б. А.* Сварка судовых конструкций: Учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1980. — 448 с.
14. *Теория* сварочных процессов: Учебник для вузов по ТЗЗ спец. Оборудование и технология сварочного производства / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др.; под ред. В. В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
15. *Сварка* и свариваемые материалы: В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
16. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 292 с.
17. *Маришкин А. К., Попков А. М., Постаушкин В. Ф.* Плавление электродной проволоки при автоматической сварке с систематическими замыканиями дугового промежутка // Автомат. сварка. — 1970. — № 4. — С. 9–11.
18. *Сварка* в машиностроении: Справочник в 4 т. / Г. А. Николаев и др. — М.: Машиностроение, 1978. — Т. 1. — 504 с.
19. *Потатьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч. 1. Сварка в активных газах. — 2-е изд., перераб. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 192 с.
20. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. — М.: Мир, 1985. — 509 с.
21. *Очков В. Ф.* Mathcad 14 для студентов и инженеров. — СПб.: BHV, 2009. — 362 с.

Поступила в редакцию 26.07.2012

НОВАЯ КНИГА

Цыбулькин Г. А. Корректирующее управление траекторным движением. — К.: Сталь, 2012. — 161 с.

В книге изложены методы корректирующего управления, составляющие основу альтернативного подхода к решению задачи повышения точности движения по заданным траекториям. Разработаны критерии точности движения и времени выхода системы на номинальный режим. Сформулирован и доказан ряд условий робастной устойчивости движения для широкого класса систем произвольного порядка с различными законами коррекции движения по криволинейным траекториям. Изложение теоретических вопросов иллюстрируется примерами и результатами компьютерного моделирования.

Для специалистов, занимающихся исследованием и проектированием многоканальных систем автоматического управления, а также для аспирантов и студентов соответствующих вузов.





НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 621.01:539.4

ОСОБЕННОСТИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОЦЕНКЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, И. Н. ЛЯСОТА, Е. М. СТАНКЕВИЧФизико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины.
79053, Украина, г. Львов, ул. Айвазовского, 56. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Высокопрочные алюминиевые сплавы благодаря комплексу физико-механических и коррозионных свойств широко применяются в современной науке и технике. Для соединения элементов конструкций, в частности в самолетостроении, используют электронно-лучевую сварку. При эксплуатации таких элементов под влиянием различных факторов часто в них происходит зарождение микро- и макроразрушений. Достаточно эффективно распространение трещин определяет метод акустической эмиссии. Целью исследования явилось изучение особенностей генерирования сигналов акустической эмиссии при статической нагрузке образцов и идентификация характера разрушения в различных участках сварных соединений алюминиевого сплава 1201-Т. По схеме трехточечного изгиба исследовали трещиностойкость образцов размерами 10×20×160 мм, изготовленных из сварных соединений плит сплава 1201-Т толщиной 20 мм, выполненных сквозной электронно-лучевой сваркой. Сигналы акустической эмиссии регистрировали системой SKOP-8М. Для селекции полезных сигналов от помех использовали метод параллельного измерительного канала. Из анализа волновых отображений и непрерывных вейвлет-преобразований зарегистрированных сигналов акустической эмиссии установлено, что метод позволяет идентифицировать источники их излучения при статическом разрушении алюминиевых сплавов и их сварных соединений. Вязкое (металл шва и зоны термического влияния) и хрупковязкое (основной металл) разрушение твердого раствора меди в алюминии генерирует сигналы низких и средних амплитуд ($A = 0,2...0,5$ мВ), для которых критериальный показатель колеблется в пределах 0,15...0,3. Отрыв оплавленных зерен сопровождается генерированием сигналов акустической эмиссии с диапазоном амплитуд $A = 0,4...0,5$ мВ и $\kappa = 0,3...0,4$, а растрескивание хрупких интерметаллидов — мощными сигналами ($A = 0,5...4$ мВ) с показателем $\kappa = 0,5...0,9$. Библиогр. 15, рис. 5.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, сварные соединения, акустическая эмиссия, микроструктура, микрофрактограмма, вейвлет-преобразование, механизм разрушения

Современное развитие промышленности Украины стимулирует рост объемов производства алюминия и его высокопрочных сплавов благодаря комплексу их физико-механических, коррозионных и технологических свойств, позволяющих успешно применять практически во всех областях науки и техники. Для соединения ответственных элементов конструкций (авиакосмическая промышленность, строительство и пр.) широко применяют электронно-лучевую сварку (ЭЛС), поскольку она обеспечивает высокое качество металла шва во время соединения больших толщин за один проход.

При эксплуатации элементов конструкций, изготовленных из алюминиевых сплавов, под влиянием различных факторов возможно зарождение и развитие в них микро- и макроразрушений. Распространение трещин достаточно эффективно определяет метод акустической эмиссии (АЭ) [1]. Однако для оценки разрушения сварных соединений (СС) алюминиевых сплавов метод АЭ применялся мало [2]. Поэтому для эффективного ди-

агностирования состояния элементов конструкций, изготовленных из алюминиевых сплавов, важно исследовать активность излучения АЭ и особенности сигналов во время зарождения и развития процессов разрушения различных зон СС.

Некоторые результаты таких исследований известны. В частности, авторы работы [3] применяли метод АЭ для исследования развития искусственно созданных дефектов-имитаторов в виде трещин во время нагрузки внутренним давлением сварных резервуаров, выполненных из сплава АМг6М. На основе анализа сигналов акустической эмиссии (САЭ), записанных во время эксперимента, авторы определяли критический размер трещины, при котором емкость еще можно эксплуатировать.

В работе [4] исследовано влияние микроструктуры гладких образцов из технического алюминия и сплава АМг6М на излучение САЭ во время растягивания. В данном сплаве активность излучения АЭ более чем на порядок превышает активность АЭ в алюминии, что обусловлено по-



ведением границ зерен и наличием частиц интерметаллидов. В работе [5] исследовано поведение сигналов АЭ при разрушении СС из сплава АМг6М и построена зависимость характера САЭ от видов дефекта. Значительная активность сигналов АЭ (6...8 имп./с), которые характеризуются большой амплитудой, наблюдается уже при небольших напряжениях в пределах упругой деформации (80...90 МПа). Установлено, что нагрузка образца до напряжений, в результате которых появляется пластическая деформация (300...320 МПа), не вызывает заметной АЭ. Дальнейший рост деформации характеризуется появлением единичных АЭ сигналов малой энергии и активности. В зоне глубокой пластической деформации АЭ носит импульсный характер, т. е. проявляется в виде «эмиссии взрывного типа». Повышение нагрузки вплоть до разрушения сопровождается генерированием САЭ малой амплитуды.

В работах [6, 7] был установлен характер излучения САЭ во время растягивания гладких образцов, изготовленных из различных участков СС. Деформация образцов на 13 % дала суммарный счет САЭ около 500...800 имп., а в зоне сплавления при тех же условиях — $85 \cdot 10^3$ имп. Такая специфика излучения сигналов АЭ обусловлена наличием в переходной зоне значительного количества дефектов структуры и скоплением различных неметаллических включений вдоль границ зерен. Аналогичные эксперименты проводили также авторы работы [8], во время которых статическим растяжением гладких образцов с СС исследовали влияние погонной энергии аргодуговой сварки на характер излучения САЭ. Показано, что с увеличением тепловложения растет пластичность металла шва, а это приводит к уменьшению активности АЭ.

Цель настоящей статьи — изучение особенностей генерирования сигналов АЭ при статическом нагружении образцов и идентификация характера разрушения различных участков СС сплава 1201-Т.

Материалы и методика АЭ испытаний. Исследовали статическую трещиностойкость трехточечным изгибом образцов, изготовленных из СС плит толщиной 20 мм, выполненных сквозной

ЭЛС без присадочного металла. Погонная энергия сварки — 337,3 кДж/см. Материал сварных плит — термически упрочненный алюминиевый сплав марки 1201-Т. Испытывали призматические образцы $10 \times 20 \times 160$ мм четырех типов с выведенной усталостной трещиной: I — в основном металле, II — в зоне термического влияния (ЗТВ), III — в зоне сплавления и IV — в металле сварного шва.

Образцы изготавливали с соблюдением норм и характерных соотношений геометрических размеров, регламентируемых ГОСТом [9]. Длина усталостной трещины вместе с концентратором напряжений составляла 10 мм. Структурная схема для экспериментальных исследований статической трещиностойкости образцов представлена на рис. 1.

Образцы нагружали на установке СВР-5 1, усилие P через динамометр 9 передавалось на исследуемый образец 8. Раскрытие берегов трещины регистрировал тензометрический преобразователь раскрытия берегов трещины 7. Сигналы АЭ, генерируемые в результате разрушения, воспринимались первичным преобразователем АЭ 6, который устанавливали на боковой поверхности образца. Для селекции полезных сигналов от помех использовали параллельный АЭ канал 2 [1]. Электрические сигналы АЭ усиливали предусилителями 3, после чего регистрировали многоканальной измерительной АЭ системой 4 SKOP-8M [1] и обрабатывали на персональном компьютере 5. Для снижения влияния ложных САЭ от трения в местах соприкосновения поверхностей балочного образца с опорами установки устанавливали антифрикционные прокладки. Нагрузку и раскрытие берегов трещины регистрировали параметрическими каналами упомянутой выше системы. В режиме постобработки строили диаграммы «нагрузка P — раскрытие берегов трещины v », а также акустограммы активности АЭ, сопровождающей разрушение образцов. Результаты испытаний приведены в работе [10].

Для отбора сигналов использовали первичный преобразователь АЭ с рабочей полосой частот 0,2...0,6 МГц. Перед началом каждого эксперимента проводили тарировку измерительных каналов [4]. Устанавливали следующие настройки АЭ системы SKOP-8M: количество измерительных каналов — 4 (два — для регистрации САЭ), усиление каждого канала — 40 дБ, продолжительность выборки — 0,5 мс, период дискретизации аналогового сигнала — 0,25 мкс, частота среза фильтра низких частот — 700 кГц, фильтра высоких частот — 40 кГц, порог дискриминации — 28 %, уровень собственных шумов, приведенных ко входу предварительного усилителя, — 7 мкВ, коэффициент усиления предварительных усилителей составил 34 дБ.

Исследование микроструктуры и фрактографии сплава 1201-Т. Для идентификации ис-

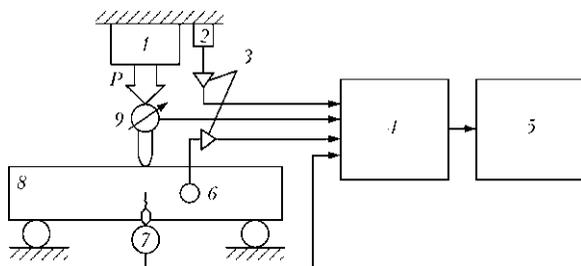


Рис. 1. Схема для экспериментальных исследований статической трещиностойкости образцов: 1...9 — см. в тексте

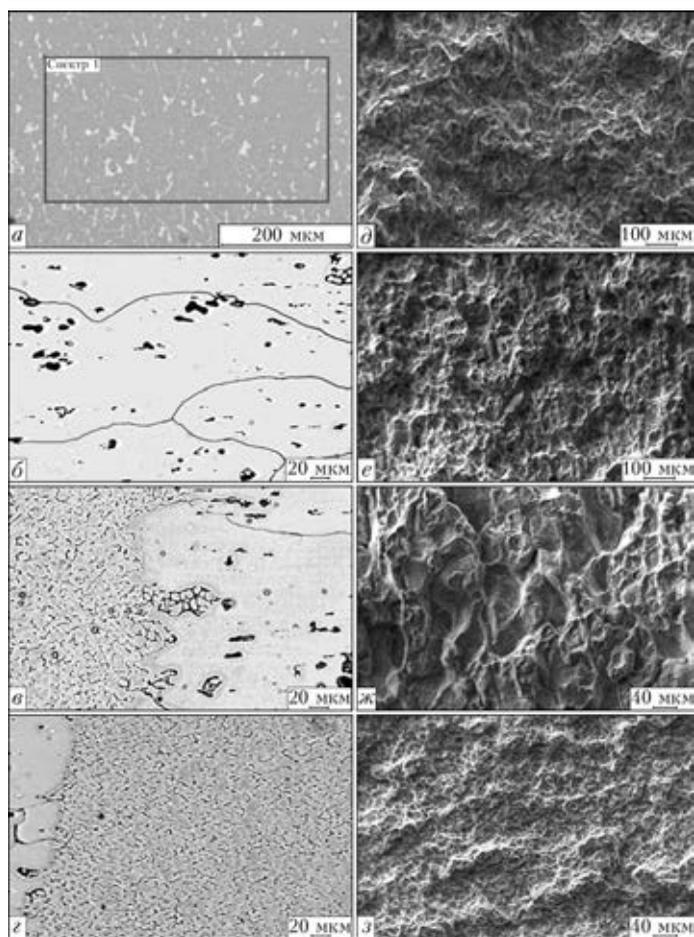


Рис 2. Микроструктуры (а–г) и микрофрактограммы (д–з) основного (а, д), металла ЗТВ (б, е), границы сплавления (в, ж) и шва (г, з)

точников разрушения методом АЭ необходимо провести микроструктурные и фрактографические исследования изломов характерных участков СС. Алюминиевый сплав марки 1201-Т системы легирования Al–Cu–Mn склонен к значительному распаду твердого раствора металла шва и ЗТВ, в которой уже при температуре 673 К и выше происходят структурные преобразования, снижающие прочность СС до уровня, характерного для металла в отожженном состоянии [11]. Поэтому каждая зона СС имеет свои особенности разрушения при квазистатической нагрузке (рис. 2).

При комнатной температуре микроструктура сплава 1201-Т состоит из зерен, тело которых составляет α -твердый раствор меди и марганца в алюминии и вторичной фазы Al_2Cu , равномерно распределенной по зерну в виде мелких игольчатых включений, а также вдоль их границ в форме крупных хлопьев (рис. 2, а). По микрофрактограмме основного металла (рис. 2, д) видно, что излом энергоемкий и соответствует хрупковязкому типу разрушения. Наблюдается значительное количество квазиоткольных фасеток. Излом в основном состоит из крупных выпуклостей и вмятин, поверхность которых усеяна мелкими фасетками. Сопоставив микроструктуру и микрофрактограмму основного металла сплава 1201-Т, видно, что

форма и размеры зерен четко совпадают с размерами выпуклостей и впадин и составляют примерно 120...150 мкм. Геометрия включений вторичной фазы Al_2Cu на микроструктуре сопоставима с размерами хрупких сколов на микрофрактограмме (25...35 мкм).

Таким образом, в основном металле сплава 1201-Т при его статическом нагружении трещина движется преимущественно по границам зерен, характер разрушения является хрупковязким, где вязкая составляющая соответствует разрушению α -твердого раствора, а хрупкая — растрескиванию включений упрочняющей фазы.

Микроструктура металла ЗТВ представляет собой рекристаллизованные зерна, обедненные по меди (рис. 2, б), которая в виде вторичной фазы Al_2Cu выделилась вдоль их границ, а также коагулировала в виде локальных скоплений во время повторного распада твердого раствора. Металл этого участка немного пластичнее по сравнению с основным металлом, поэтому из микрофрактограммы (рис. 2, е) видно преобладание вязкого разрушения и лишь кое-где встречаются фасетки растрескивания хрупких включений.

На границе металла шва и ЗТВ наблюдаются резкие структурные изменения. Здесь оплавленные крупные рекристаллизованные зерна основного металла соединены с мелкодисперсным металлом сварного шва (рис. 2, в). В процессе кристаллизации сварочной ванны вторичная фаза выделяется и объединяется в локальные включения прежде всего на выступах оплавленных зерен ЗТВ. Поэтому, как правило, граница сплавления характеризуется большим скоплением интерметаллидных фаз, что и обуславливает снижение ее пластичности. Излом образцов имеет макрорхрупкий характер (рис. 2, ж) с квазиоткольными фасетками растрескивания крупных эвтектических включений.

Высокая скорость охлаждения металла сварного шва способствует образованию мелкозернистой структуры (рис. 2, г), прочность которой почти вдвое ниже прочности основного металла. Излом имеет вязкий характер разрушения (рис. 2, з) с бугристо-чашечным рельефом и ячейками явно-го пластического течения металла.

Фрактографические исследования показали, что структурная и механическая неоднородность СС сплава 1201-Т, выполненных ЭЛС, вызывает различный характер разрушения в каждой зоне СС. Во время испытания на статическую трещиностойкость металла ЗТВ трещина в большинстве случаев меняла направление своего распространения и двигалась по границе сплавления СС, поскольку на хрупкое разрушение затрачивается значительно меньше энергии, чем на вязкое. А это

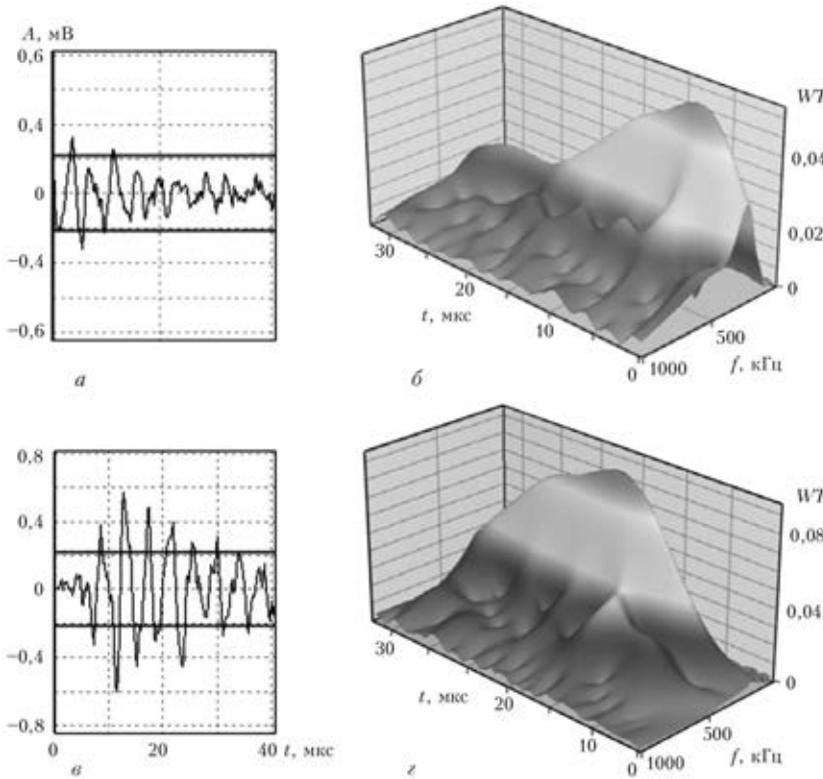


Рис. 3. Волновые отображения (а, е) и непрерывные вейвлет-преобразования (б, з) характерных САЭ (разрушение металла ЗТВ сплава 1201-Т)

свидетельствует о том, что данный участок является опасным с точки зрения прочности СС.

Изучение особенностей САЭ, генерируемых при разрушении алюминиевых сплавов. Важную информацию об особенностях динамики процессов разрушения в твердых телах можно получить с помощью методов вейвлет-преобразований [12].

В работах [13, 14] предложен критерий количественной оценки разрушения конструкционных материалов по параметрам непрерывного вейвлет-преобразования САЭ. Для исследования особенностей САЭ использована программа AGU-Vallen Wavelet [15]. В роли материнского выбран вейвлет Габора [12], позволяющий хорошо выделять локальные особенности САЭ и обеспечивающий их частотно-временное представление.

Учитывая свойства вейвлет-коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования САЭ и результаты теоретических исследований изменения амплитудно-частотных характеристик упругих волн АЭ при различных процессах разрушения в твердых телах, для количественной характеристики САЭ и их идентификации предложен критериальный показатель [14]

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \Delta f_0}{\Delta f},$$

где WT_{\max} — максимальное значение вейвлет-коэффициента события АЭ в определенном мо-

мент времени; Δf — диапазон полосы спектра частот, которая соответствует WT_{\max} в событии АЭ, в координатах вейвлет-коэффициент WT — частота f ; Δf_0 — ширина рабочей полосы АЭ тракта, которая определяется рабочей полосой частот преобразователя АЭ (здесь 0,2...0,6 МГц).

В зависимости от значения экспериментально установленного критериального параметра типы макро-разрушения конструкционных материалов разделены на вязкое ($\kappa \leq 0,2$), вязкохрупкое ($0,2 \leq \kappa \leq 0,3$) и хрупкое ($\kappa \geq 0,3$) разрушение. С дальнейшим увеличением значения склонность к хрупкому разрушению материала объекта контроля возрастает [14].

Обработку САЭ, зарегистрированных во время разрушения различных участков СС, осуществляли в такой последовательности:

1) строили непрерывное вейвлет-преобразование для каждого сигнала и устанавливали макси-

мальное значение вейвлет-коэффициента в событии АЭ;

2) строили проекцию непрерывного вейвлет-преобразования в плоскости $WT - f$ при достижении WT_{\max} ;

3) определяли ширину полосы частот Δf (МГц), которая соответствует WT_{\max} ;

4) рассчитывали значение критериального показателя κ по соотношению, приведенному выше.

Во время испытаний АЭ основного металла сплава 1201-Т регистрировали САЭ двух типов: САЭ с небольшими амплитудами ($A = 0,4...0,5$ мВ) и $\kappa = 0,2...0,3$; мощные САЭ ($A = 1,5...2$ мВ) и $\kappa = 0,5...0,6$.

Как и в случае основного металла, разрушение сопровождалось генерированием САЭ двух типов. Характерной особенностью всех сигналов является их значительная продолжительность во времени ($t = 20...30$ мкс) по сравнению с САЭ, зарегистрированными при разрушении других материалов [13, 14], что обуславливает характерную форму вейвлет-спектров (см. рис. 3, б, з).

К первому типу отнесли слабые сигналы (см. рис. 3, а) с амплитудами $A = 0,2...0,3$ мВ, для которых свойственны низкие значения максимальных вейвлет-коэффициентов $WT_{\max} = 0,04...0,05$ (см. рис. 3, б), а также широкие полосы частот $\Delta f = 125...130$ кГц, $\kappa = 0,15...0,2$. Эти САЭ генерируются при вязком разрушении твердого рас-

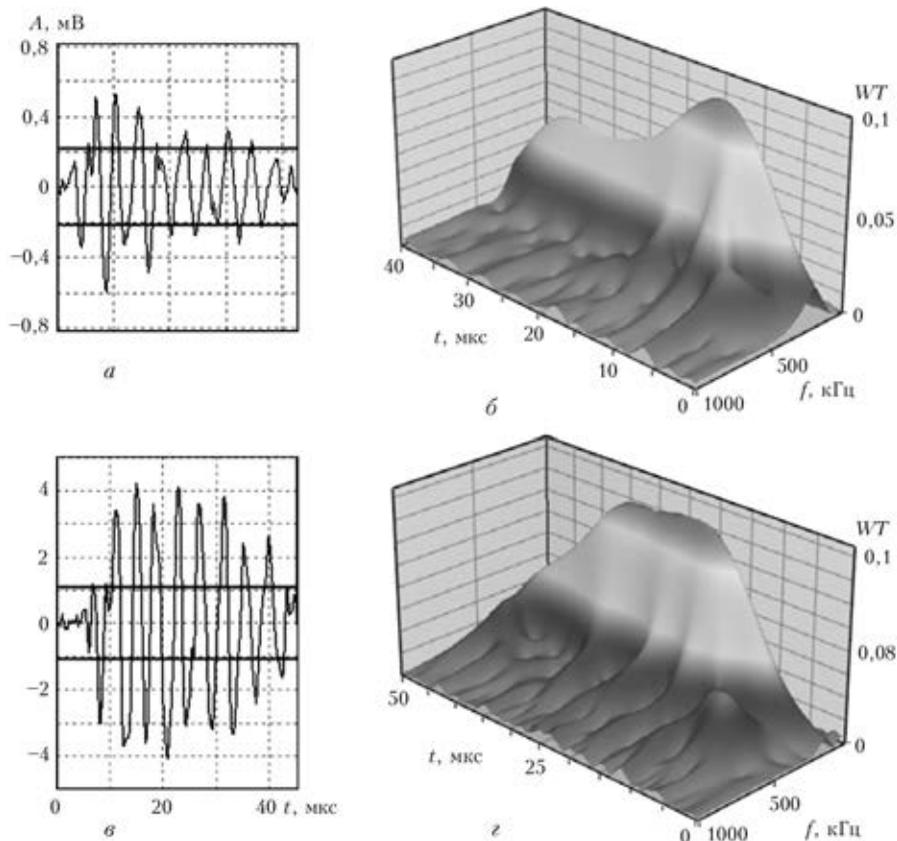


Рис. 4. Волновые отображения (а, в) и непрерывные вейвлет-преобразования (б, г) характерных САЭ (разрушение границы сплавления СС сплава 1201-Т)

твор, который составляет тело рекристаллизованных, пластичных зерен ЗТВ.

Для второй группы САЭ характерны высокие значения максимальных вейвлет-коэффициентов $WT_{max} = 0,08...0,1$ (см. рис. 3, г), а также узкие полосы частот $\Delta f = 95...105$ кГц. Эти сигналы генерируются при квазихрупком растрескивании локальных скоплений и тонких слоев интерметаллида Al_2Cu , размещенных на межзеренных границах.

Особенностью разрушения границы сплавления СС является то, что оно сопровождается как растрескиванием крупных скоплений эвтектических включений, так и отрывом оплавленных зерен

ЗТВ. Во время последнего генерируются САЭ с максимальными амплитудами $A = 0,4...0,5$ мВ и $\kappa = 0,3...0,4$ (см. рис. 4, а, б).

Хрупкое откалывание интерметаллидов на границе сплавления генерирует мощные сигналы высоких амплитуд $A = 4...5$ мВ (см. рис. 4, в), значения максимальных вейвлет-коэффициентов которых составляет $WT_{max} = 0,15...0,16$ (см. рис. 4, г), а полосы частот $\Delta f = 80...90$ кГц. Критериальный показатель $\kappa = 0,7...0,9$ здесь является самым высоким.

Сварной шов соединения сплава 1201-Т по сравнению с основным металлом имеет мелкодисперсную структуру и разупрочнен. Разруше-

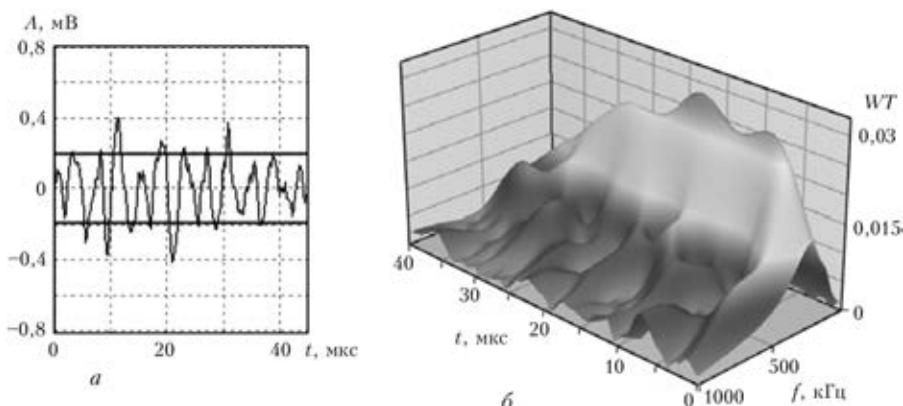


Рис. 5. Волновое отображение (а) и непрерывное вейвлет-преобразование (б) характерных САЭ (разрушение металла шва СС сплава 1201-Т)



ние в этом случае происходит по вязкому механизму и сопровождается слабыми сигналами АЭ (см. рис. 5, а) при $\kappa = 0,1 \dots 0,15$. Характерная их особенность — значительная продолжительность ($t = 40 \dots 60$ мкс) и наличие нескольких пиков на вейвлет-спектрах (см. рис. 5, б), что свидетельствует об одновременном пластическом разрушении матрицы и отслоении включений.

Итак, растрескивание включений интерметаллидов происходит по хрупкому механизму ($\kappa \geq 0,3$) с максимальными значениями κ на границе сплавления, поскольку там наибольшее скопление крупных интерметаллидов, а для твердого раствора меди в алюминии характерно разрушение в основном по вязкому механизму ($\kappa \leq 0,2$). Только за пределами СС характер меняется на хрупковязкий, поскольку твердость основного металла значительно выше, чем в шве и ЗТВ.

Заключение. Из анализа зарегистрированных волновых отображений САЭ и непрерывных вейвлет-преобразований установлено, что метод АЭ сигналов позволяет идентифицировать источники излучения САЭ при статическом нагружении алюминиевых сплавов и их СС. Вязкое (металл шва и ЗТВ) и хрупковязкое (основной металл) разрушение твердого раствора меди в алюминии генерирует САЭ низких и средних амплитуд ($A = 0,2 \dots 0,5$ мВ), для которых критериальный показатель κ колеблется в пределах $0,15 \dots 0,3$. Отрыв оплавленных зерен сопровождается генерированием САЭ с диапазоном амплитуд $A = 0,5 \dots 4$ мВ и $\kappa = 0,3 \dots 0,4$, а растрескивание хрупких интерметаллидов — мощными сигналами ($A = 0,5 \dots 4$ мВ) с показателем $\kappa = 0,5 \dots 0,9$.

По результатам экспериментальных испытаний установлено, что наиболее опасной (с точки зрения прочности конструкций) является граница сплавления металла шва и ЗТВ, для которой характерно резкое изменение размеров структурных составляющих и механических характеристик. В этом случае разрушение происходит по квазихрупкому механизму, и, как результат, при статическом нагружении СС трещина направляется в эту область, двигаясь вдоль скоплений вторичных фаз и оплавленных плоскостей зерен ЗТВ, уменьшая затраты энергии на разрушение. При этом

параметры сигналов АЭ меняются согласно механизмам разрушения различных зон СС.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: У 3 т. — К.: Наук. думка, 2009. — 878 с.
2. Скальський В. Р., Лясота І. М. Застосування явища акустичної емісії для діагностування руйнування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів (Огляд) // *Машинознавство*. — 2009. — № 9. — С. 42–47.
3. Мезинцев Е. Д., Тихий В. Г., Карасев Л. П. Применение имитаторов дефектов при испытании акустико-эмиссионной системы технической диагностики // *Автомат. сварка*. — 1982. — № 9. — С. 28–30.
4. Тихонов Л. В., Прокопенко Г. И. Детонационные механизмы деформации, разрушения и акустической эмиссии в алюминии и его сплавах // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 1991. — № 1. — С. 73–76.
5. Тихий В. Г., Санин Ф. П., Борщевская Д. Г. Исследование зависимости сигналов акустической эмиссии от характера дефектов сварки в сплаве АМг6 // *Автомат. сварка*. — 1982. — № 9. — С. 36–38.
6. Скальський В. Р., Сергієнко О. М., Голаскі Л. Генерування акустичної емісії тріщинами, що розвиваються у зварних з'єднаннях // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 1999. — № 4. — С. 23–31.
7. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. — Львів: СПОЛОМ, 2005. — 396 с.
8. Venkitakrishnan P. V., Sinha P. P., Krishnamurthy R. Study and analysis of effect of various thermal processes in AA2219 annealed sheet using acoustic emissions // *Mater. and Desian*. — 2006. — 27. — P. 770–775.
9. ГОСТ 25506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 61 с.
10. Скальський В. Р., Лясота І. М. Застосування методу акустичної емісії для визначення моменту початку макроруйнування зварних з'єднань алюмінієвого сплаву // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 2012. — № 3. — С. 7–12.
11. Разупрочнение высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением / А. В. Лозовская, А. А. Чайка, А. А. Бондарев и др. // *Автомат. сварка*. — 2001. — № 3. — С. 15–19.
12. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Усп. физ. наук*. — 1996. — 166, № 11. — С. 1145–1170.
13. Скальський В. Р., Буйло С. И., Станкевич Е. М. Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. — 2012. — № 5. — С. 26–34.
14. Скальський В. Р., Ботвіна Л. Р., Станкевич О. М. Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 2011. — № 3. — С. 12–17.
15. Vallen systeme: The Acoustic emission Company. — www.vallen.de.

Поступила в редакцию 09.07.2012

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ ТРЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1

А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ¹, Ю. М. ТКАЧЕНКО², Р. А. КУЛИКОВСКИЙ²,
В. И. БРАГИНЕЦ³, И. В. ЗЯХОР⁴

¹ОАО «Мотор Сич». Украина, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15;

²Запорожский национальный университет МОН Украины. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64;

³НИЦ плазменных технологий Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
69068, г. Запорожье, ул. Уральская, 3;

⁴Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты исследований формирования соединений при сварке трением (СТ) титанового сплава ВТЗ-1, который используется в конструкции осевого компрессора авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Цель работы состояла в оптимизации режима СТ сплава ВТЗ-1, исходя из возможности ее реализации на современном оборудовании для линейной сварки трением (ЛСТ) применительно к изготовлению и ремонту моноколес ГТД, так называемых блисков. Определение оптимальных значений параметров режима СТ выполняли на основе результатов механических испытаний на разрыв, металлографических исследований и измерения микротвердости сварных соединений, полученных при СТ на воздухе и в защитной газовой среде (аргоне). Установлено, что при СТ сплава ВТЗ-1 получение качественных (бездефектных) соединений возможно в широком диапазоне изменения технологических параметров при условии обеспечения заданного значения суммарной осадки при сварке. Показатели прочности соединений превышают соответствующие показатели для основного металла сплава ВТЗ-1. В результате интенсивной термомеханической деформации при температурах, превышающих температуру (β -перехода сплава ВТЗ-1 и быстрого охлаждения после СТ, металл в зоне соединения имеет мелкозернистую динамически рекристаллизованную структуру и повышенную твердость. На основе полученных результатов оптимизирован режим СТ титанового сплава ВТЗ-1 при сравнительно низкой линейной скорости относительного перемещения заготовок, которая технически достижима при ЛСТ титановых сплавов на современном оборудовании. Библиогр. 22, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: сварка трением, титановые сплавы, механические свойства, равнопрочность, режимы сварки

Титановые сплавы широко применяют в авиационном двигателестроении, в частности для изготовления деталей осевого компрессора газотурбинных двигателей (ГТД). Современные способы механической обработки позволяют изготавливать сложные детали, себестоимость которых относительно высокая. Однако, чем сложнее процесс механической обработки, тем больше вероятность образования дефектов.

Ремонтные операции наиболее часто выполняются сваркой и наплавкой. Однако при ремонте деталей из сложнолегированных сплавов, в частности титановых сплавов, чрезвычайно трудно получить равнопрочные сварные соединения. Это особенно важно при ремонте подвижных деталей, например, лопаток моноколес ГТД. Так, из-за высокой химической активности титана по отношению к атмосферным газам (кислороду, азоту, водороду) при сварке плавлением происходит насыщение ими металла сварного соединения. Это

приводит к снижению механических свойств и охрупчиванию сварного соединения, что негативно сказывается на уровне надежности восстановленного изделия. Защита зоны сварки бескислородными флюсами, чистым аргонном, гелием либо их смесями обеспечивает коэффициент прочности сварного соединения не более 0,9 [1].

В процессе сварки необходимо также обеспечить минимальные деформации элементов, поскольку от них будут зависеть значения припусков, и, следовательно, объем последующей механообработки. Нежелательна и послесварочная термообработка сварного изделия (в ряде случаев она невозможна). Перечисленные выше причины ограничивают применение известных способов сварки плавлением титана и его сплавов.

Минимизировать указанные недостатки можно с помощью способов сварки давлением, в частности сварки трением (СТ). Соединение металлов этим способом осуществляется в вязкопластичном состоянии без расплавления соединяемых поверхностей. Благодаря этому свойства металла зо-

* В работе принимал участие И. А. Петрик.



ны соединения (ЗС) и зоны термического влияния (ЗТВ) изменяются незначительно, а сварочные напряжения и остаточные деформации, как правило, значительно меньше, чем при сварке плавлением [2].

Вопросам применения различных технологий СТ титановых сплавов посвящен ряд отечественных и зарубежных публикаций [3–18]. В работе [3] показано, что конвенционная (обычная) СТ позволяет получить качественные соединения титанового сплава ОТ4, механические свойства которых находятся на уровне свойств основного металла (ОМ). Параметры режима СТ устанавливали на уровне параметров для низколегированных сталей [2] (давление при нагреве P_n и проковке $P_{пр}$ соответственно 60 и 100 МПа, суммарная осадка при сварке $\Delta_{св} = 6$ мм).

В работах [4, 5] изучено влияние окружающей атмосферы и защитной среды (сварка на воздухе и в аргоне), а также параметров режима конвенционной СТ на формирование структуры и механические свойства системы титана (99,7 %) и титановых сплавов соединений Ti–6Al–4V, Ti–6Al–2Sn–4Cr–2Mo. Установлено, что для всех исследованных сплавов наличие защитной атмосферы не оказывает влияния на формирование структуры металла в ЗС. Параметры режима СТ в [4] отличались сравнительно низкими значениями давления при нагреве P_n и проковке $P_{пр}$ (25,5 и 31,1 МПа соответственно) и линейной скорости относительного перемещения $v = 2,2$ м/с.

В работе [6] исследованы особенности формирования структуры и механических свойств сварных соединений различных титановых сплавов при инерционной сварке трением (ИСТ) дисков ротора компрессора авиационных ГТД. Изучена свариваемость различных титановых сплавов, в частности, Ti–6Al–4V, Ti–6Al–4V–2Sn, Ti–8Al–1V–1Mo, Ti–6Al–2Sn–4Cr–2Mo, Ti–6Al–2Sn–4Cr–6Mo. На основе всесторонних механических испытаний и металлографических исследований установлено, что ИСТ обеспечивает получение сварных соединений, удовлетворяющих нормативным требованиям. При этом показатели прочности сварных соединений выше, а показатели пластичности и усталости ниже, чем таковые для ОМ. Следует отметить очень высокое значение начальной линейной скорости относительного перемещения при ИСТ титановых сплавов: $v_{нач} = 35$ м/с (частота вращения 1130 мин^{-1} , внешний диаметр цилиндрических заготовок 584 мм).

Результаты исследований структурных изменений и связанных с ними сварочных напряжений при ИСТ двухфазного ($\alpha + \beta$)-сплава Ti–6Al–2Sn–4Cr–6Mo представлены в [7]. Установлено, что структурные изменения металла при СТ вызывают существенное увеличение показателей твердости металла в ЗС. В то же время максимальный

уровень остаточных сварочных напряжений фиксируется на границе ЗТВ и ОМ и это вызывает необходимость проведения термической обработки соединений.

В работе [8] приведен пример промышленного использования ИСТ при изготовлении компонентов ротора вертолета из сплава системы Ti–6Al–4V. Отмечается высокое качество металла в ЗС и отсутствие каких-либо дефектов, что обеспечивает соответствие механических свойств требованиям технических условий.

Таким образом, при СТ вращением титановых сплавов возможно получение качественных сварных соединений в широком диапазоне изменения технологических параметров: $P_n = 25,5 \dots 350$ МПа, $\Delta_{св} = 2 \dots 18$ мм, $v = 2,2 \dots 35$ м/с — при условии обеспечения заданной осадки. При соединении изделий из титана и его сплавов используют и другие разновидности СТ. Например, для изготовления трубчатых изделий сложной конфигурации предложено использовать СТ с перемещением [9].

При изготовлении и ремонте моноколес ГТД, так называемых блисков, перспективным является использование линейной сварки трением (ЛСТ) [10]. В ряде зарубежных публикаций рассмотрены перспективы использования ЛСТ при изготовлении «блисков» [11, 12], изучены структуры и механические свойства соединений титановых сплавов, полученных ЛСТ [13, 14], описаны модели термомеханических процессов при ЛСТ [15, 16], конструкции и технические характеристики сварочного оборудования [10, 17].

Анализ имеющихся публикаций показывает, что получение качественных соединений титановых сплавов при ЛСТ возможно при условии обеспечения в процессе нагрева определенной мощности тепловыделения, достаточной для быстрой пластификации и деформации на заданную величину свариваемого металла в ЗС. Значение мощности тепловыделения при ЛСТ определяется в большей степени частотой и амплитудой относительного колебательного перемещения и в меньшей — давлением при нагреве [15, 16].

При проектировании прототипа установки для ЛСТ моноколес ГТД, производимых на ОАО «Мотор Сич», возникла проблема оптимизации его технических характеристик. Это связано с выбором оптимального режима ЛСТ отечественных высокопрочных титановых сплавов. Установить оптимальные режимы ЛСТ для конкретных типоразмеров заготовок сварных моноколес ГТД, пользуясь имеющимися данными по СТ вращением (конвенционной, инерционной), сложно. Они могут быть использованы только частично, поскольку в основном изучалась свариваемость зарубежных титановых сплавов и в большинстве работ рекомендовано использование сравнитель-

но больших значений линейной скорости перемещения заготовок ($v = 2,2...35$ м/с).

Принципиальным отличием ЛСТ металлов является сложность технической реализации необходимых параметров процесса. Современные сварочные машины для ЛСТ способны работать в широком диапазоне частот (10...250 Гц) и амплитуды колебаний (1...7 мм) [10]. Это позволяет устанавливать, например, при соединении термопластов требуемое сочетание частоты и амплитуды колебаний и успешно использовать ЛСТ в промышленных условиях. Однако при сравнительно больших значениях осевого давления (ЛСТ высокопрочных сплавов) сочетание высоких значений частоты и амплитуды колебаний технически трудноосуществимо. Поэтому при ЛСТ, как правило, $v \leq 1,0$ м/с [10], что и предопределяет особенности формирования сварных соединений по сравнению с обычной СТ.

По этой причине при оптимизации режима ЛСТ отечественных титановых сплавов актуальным является определение допустимых пределов изменения технологических параметров — давления и времени нагрева t_n при сравнительно низких значениях линейной скорости, обусловленных спецификой процесса и техническими характеристиками оборудования для ЛСТ. Для изучения технической возможности формирования качественных (бездефектных) соединений высокопрочного титанового сплава ВТЗ-1 при изготовлении моноколес ГТД и для оценки их механических свойств проводили эксперименты по СТ вращением, поскольку термодформационный цикл этой разновидности СТ идентичен таковому при ЛСТ [2].

Целью настоящей работы являлась оптимизация режимов СТ высокопрочного титанового сплава ВТЗ-1 при сравнительно низком заданном значении линейной скорости относительного перемещения, что технически достижимо при ЛСТ на современном оборудовании.

Предварительные эксперименты по изучению формирования структуры сварных соединений при СТ образцов сплава ВТЗ-1 диаметром 10...30 мм выполняли на установке СТ120, обеспечивающей регулирование значений частоты вращения, осевого

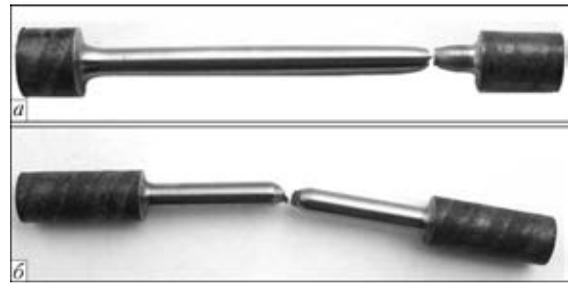


Рис. 1. Стандартный (а) и специальный (б) образцы сварных соединений сплава ВТЗ-1 после испытаний на разрыв

усилия и времени торможения вращения в широких диапазонах [18]. Сварку заготовок диаметром 10 мм сплава ВТЗ-1 для проведения механических испытаний и металлографических исследований выполняли на модернизированной машине МСТ-2, обеспечивающей цикл СТ при постоянной частоте вращения 1430 мин^{-1} и $P_{пр} = P_n$. СТ образцов выполняли как на воздухе, так и в среде аргона. Химический состав сплава ВТЗ-1 следующий, мас. %: 0,20...0,70 Fe; до 0,10 С; 0,150...0,40 Si; 0,8...2,3 Cr; 2,0...3,0 Mo; до 0,05 N; 5,5...7,0 Al; до 0,50 Zr; основа — Ti; до 0,18 O; до 0,015 H; до 0,3 — примеси [19].

Механические свойства сплава ВТЗ-1 следующие: $\sigma_B = 1000...1250$ МПа; $\delta = 12$ %; $\psi = 32...35$ %; $KCU = 300$ кДж/м²; твердость (HRC после закалки + отпуска) 38...42 [20].

Временное сопротивление растяжению полученных сварных соединений исследовали на разрывной машине ИР-100. Испытывали как стандартные образцы, так и специальные образцы с надрезом по зоне соединения (рис. 1), что позволяло определить показатели прочности металла в этой зоне. Микротвердость металла в ЗС определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3. Основным критерием образования качественного сварного соединения являлось условие обеспечения максимальных показателей прочности сварного соединения при минимальном значении осадки. При отработке режимов СТ значения технологических параметров изменяли в следующих диапазонах: $P_n = P_{пр} = 10...30$ МПа, $t_n = 1,8...8,0$ с. При частоте вращения 1430 мин^{-1} и диаметре заготовок 10 мм $v = 0,75$ м/с, что соответствует

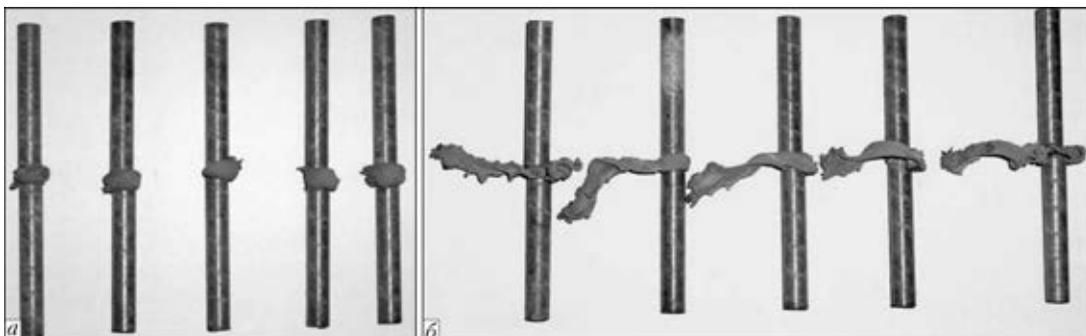


Рис. 2. Сварные соединения, выполненные СТ при $P_n = P_{nm} = 15$ МПа, $t_n = 2,2$ (а) и 4,5 с (б)

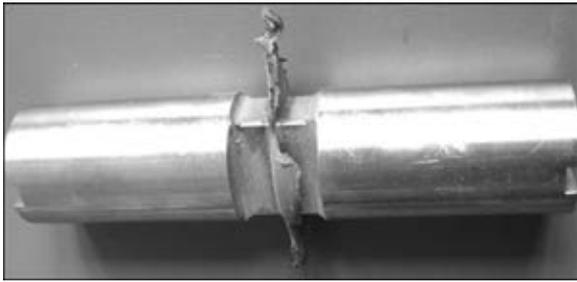


Рис. 3. Сварное соединение титанового сплава, выполненное ЛСТ (образец предоставлен Британским институтом сварки)

значениям, достижимым при ЛСТ высокопрочных сплавов на современном сварочном оборудовании [10].

Как видно из рис. 2, форма образующегося усиления (грата) при $v = 0,75$ м/с приблизительно соответствует форме грата при ЛСТ титанового сплава системы Ti-6Al-4V (рис. 3). Форма грата изменяется при увеличении t_n с 2,2 до 4,5 с, что свидетельствует о предпочтительности режимов СТ с минимальным t_n (рис. 2).

Характеристики прочности сварных соединений, полученных при СТ, представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов показал, что при СТ сплава ВТ3-1 в сварных соединениях достигаются показатели прочности не ниже показателей ОМ при всех рассмотренных выше значениях P_n : 10, 15, 27 МПа. Однако t_n для различных значений P_n существенно отличается. Так, при $P_n = 10$ МПа t_n должно составлять не менее 5,3 с, при $P_n = 15$ МПа — не менее 2,2 с, а при

$P_n = 27$ МПа качественные соединения получены при $t_n = 2$ с.

Увеличение времени нагрева приводит к росту общей осадки образцов при незначительном повышении показателей прочности сварного соединения. Например, при $P_n = 10$ МПа прочность соединений превышает показатели ОМ при $t_n \geq 5,3$ с, однако в этом случае значительно увеличивается суммарная осадка образцов до 24 мм по сравнению с $\Delta_{св} = 7$ мм при $P_n = 15$ МПа и $t_n = 2,2$ с. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в производственных условиях с точки зрения минимизации припусков на осадку и последующую механическую обработку P_n следует устанавливать в диапазоне значений 15...27 МПа.

Аналогичные результаты, полученные при изучении влияния общей осадки при СТ сплава системы Ti-6Al-4V на качество соединений, представлены в работе [4]. Установлено, что при $v = 2,2$ м/с, $P_n = 25,5$, $P_{пр} = 31,1$ МПа возможно снижение суммарной осадки при сварке с 12,7 до 3,2 мм без ущерба для качества соединений. Подобные результаты получены и в работе [5], однако при значительно больших значениях v , P_n , $P_{пр}$.

Как уже отмечалось, титан характеризуется высокой химической активностью по отношению к газам, находящимся в атмосфере при температуре более 350 °С. Проверку влияния возможного насыщения газом металла шва приводили на образцах, полученных СТ на воздухе и в среде газа неактивного по отношению к титану и его сплавам. Для защиты ЗС при СТ использовали аргон. Установлено, что при СТ на воздухе наблюдается повышение твердости металла на поверхности образцов в металле ЗТВ на глубину до 0,5 мм. Кроме того, усиление шва, образующееся в процессе осадки, имеет высокую твердость в результате взаимодействия пластифицированного металла, вытесняемого из стыка, с кислородом и азотом воздуха.

Результаты механических испытаний сварных соединений стандартных образцов сплава ВТ3-1 диаметром 10 мм, выполненных в среде аргона, приведены в таблице. Установлено, что разрушение стандартных образцов происходит по ОМ за пределами ЗС и ЗТВ (см. рис. 1, а). Существенного

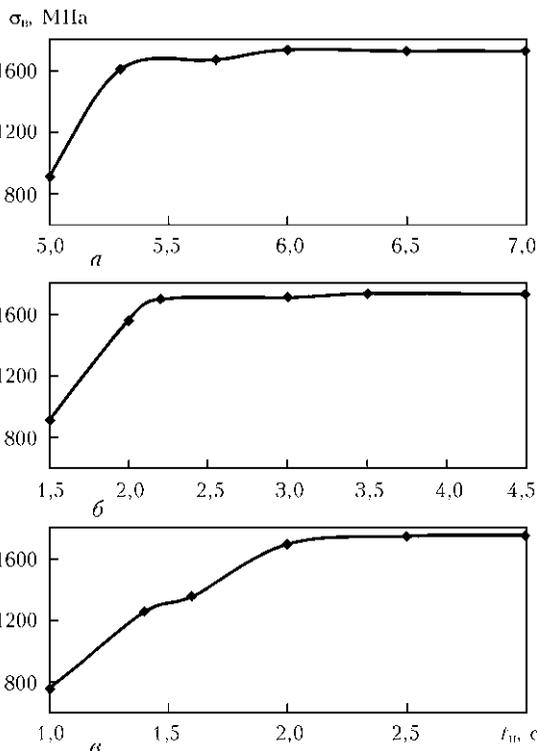


Рис. 4. Зависимость предела прочности металла зоны соединения сплава ВТ3-1 от времени нагрева при $P_n = 10$ (а); 15 (б) и 27 (в) МПа

Результаты механических испытаний сварных соединений стандартных образцов сплава ВТ3-1 на прочность при растяжении ($t_n = 2,2$ с, $P_n = 15$ МПа)

Номер образца	$\Delta_{св}$, мм	σ_v , МПа
1	6	1321
2	7	1446
3	6	1326
4	8	1258

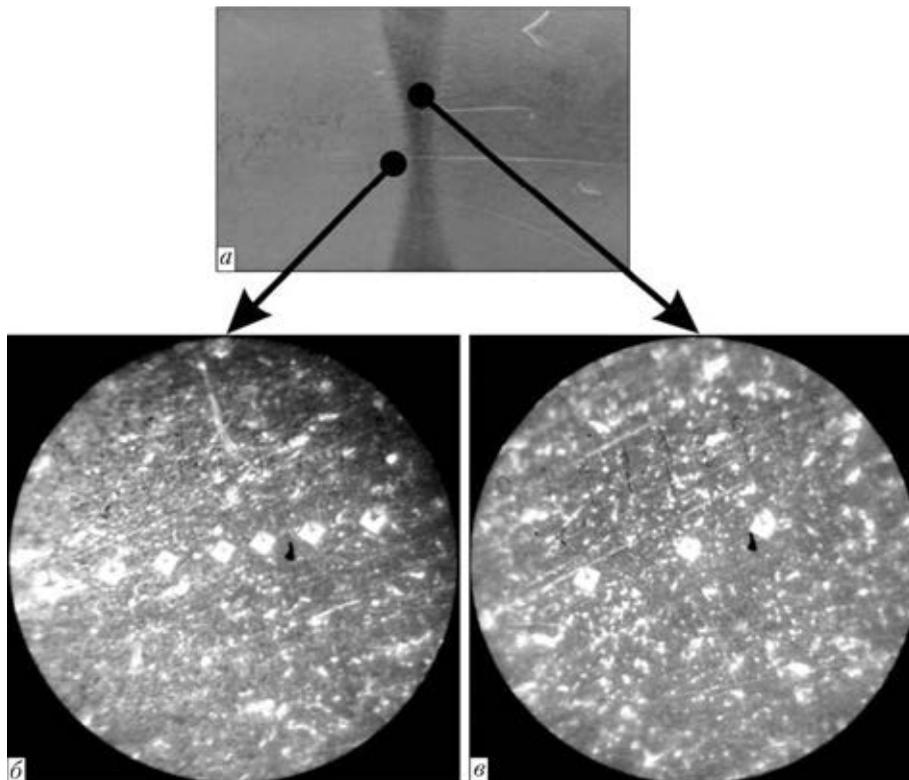


Рис. 5. Макроструктура (а) и зоны определения микротвердости (б, в, $\times 100$) сварного соединения сплава ВТ3-1, выполненного СТ

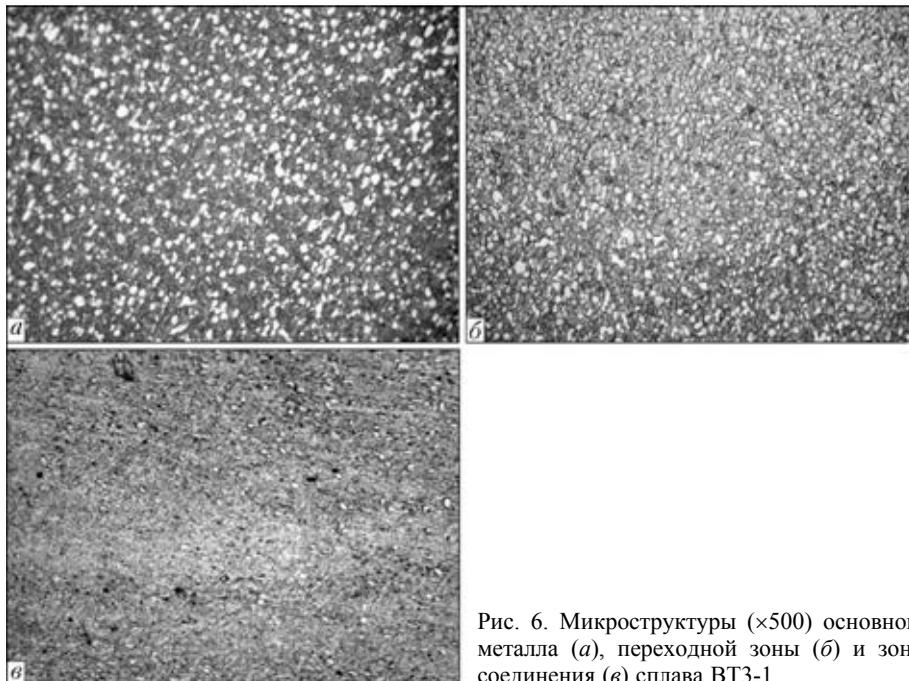


Рис. 6. Микроструктуры ($\times 500$) основного металла (а), переходной зоны (б) и зоны соединения (в) сплава ВТ3-1

влияния окружающей атмосферы на показатели прочности соединений при оптимальных значениях давления и времени нагрева не выявлено.

Полученные результаты позволили установить, что показатели прочности сварных соединений превышают соответствующие показатели для ОМ. Изучение микроструктуры сварных соединений, выполненных как на воздухе, так и в аргоне, выявило разницу травимости металла ЗС,

околошовной зоны и ОМ (рис. 5, а). При этом значения микротвердости изменяются от 4,6 ГПа в ОМ до 4,8 ГПа в металле ЗС.

По нашему мнению, увеличение показателей прочности и твердости металла шва связано с интенсивной термомеханической деформацией металла при температурах, превышающих температуру β -перехода. В результате дробления и перемешивания структурных составляющих сплава



BT3-1 в процессе СТ и быстрого охлаждения после сварки происходят значительные структурные изменения в ЗС: формирование мелкозернистой динамически рекристаллизованной структуры из β -зерен с дисперсными выделениями α -фазы (рис. 6).

Кроме того, для соединений, полученных при СТ на воздухе, повышение твердости может быть обусловлено кратковременным окислением контактных поверхностей на начальных стадиях процесса (до начала вытеснения пластифицированного металла из стыка) и перераспределением образовавшихся оксидных фаз титана в ЗС. Формирование ЗС с повышенной твердостью обусловлено особенностью распада β -титана в условиях резкого охлаждения и присутствия в шве небольших количеств кислорода, а также частичным присутствием β -фазы в метастабильном состоянии [3]. Известно, что упрочнение ($\alpha+\beta$)-сплавов титана при высокотемпературной термомеханической обработке тем больше, чем больше количество остаточной β -фазы после нее [21].

Таким образом, в процессе СТ металл в ЗС подвергается высокотемпературной термомеханической обработке, которая обеспечивает измельчение структуры, увеличение плотности дислокаций количества β -фазы, что, по данным [22], для сплава BT3-1 увеличивает прочность на 280...480 МПа по сравнению с обычной термообработкой.

Выводы

1. Экспериментально установлено влияние параметров режимов СТ на формирование структуры и механические свойства сварных соединений титанового сплава BT3-1. Показатели прочности соединений при $P_n = 15...27$ МПа и t_n более 2,2 с превышают показатели ОМ.

2. Увеличение прочности сварных соединений сплава BT3-1 по сравнению с показателями ОМ связано с высокотемпературной термомеханической деформацией металла при СТ. В результате дробления и перемешивания структурных составляющих сплава BT3-1 в процессе нагрева и деформации и быстрого охлаждения после сварки происходят значительные структурные изменения в ЗС: формирование мелкозернистой динамически рекристаллизованной структуры из β -зерен с дисперсными выделениями α -фазы.

3. На основе полученных результатов оптимизирован режим СТ сплава BT3-1 при сравнительно низкой линейной скорости относительного перемещения, что технически достижимо при ЛСТ титановых сплавов на современном оборудовании.

1. Третьяков Ф. Е. Сварка плавлением титана и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1968. — 148 с.
2. Сварка трением: Справочник / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Вилль и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
3. Большаков М. В., Черницын А. И. Структура и свойства соединений титанового сплава OT4, выполненных сваркой трением // Свароч. пр-во. — 1974. — № 7. — С. 40–42.
4. Eichhorn F., Kes P., Maser D. Gefügeausbildung und Eigenschaften artgleicher Reibschweißverbindungen aus Titanwerkstoffen // Schweißen und Schneiden. — 1990. — 42, № 4. — S. 189–191.
5. Parameter study into the friction welding of the intermetallic TiAl and the alloy Ti6Al4V / K.-H. Bohm, V. Ventzke, M. Kocak et al. // Welding and Cutting. — 2003. — № 2. — P. 90–96.
6. Friction welding of titanium alloys / C. G. Nessler, D. A. Rutz, R. D. Eng, P. A. Vozzella // Welding J. — 1971. — 50, № 9. — P. 379–385.
7. Microstructural and residual stress development due to inertia friction welding in Ti–6246 / M. M. Attallah, M. Preuss, C. Boonchareon et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2012. — 43, № 9. — P. 3149–3161.
8. Schwartz M. M. Inertia friction welding of helicopter components // DVS Berichte Lectures of the 2nd Intern. conf. in Essen «Welding and Brazing in Aircraft and Spacecraft Construction», Sept. 16–17, 1985. — P. 36–43.
9. Threadgill Russell M. J. Friction welding of near shape performs in Ti–6Al–4V // The Proc. of the 11th World conf. on titanium «Ti-2007 Science and Technology», Kyoto, Japan, June 3–7, 2007. — The Japan Institute of Metals, 2007. — P. 1283–1286.
10. Штрикман М. М. Сварка линейным трением // Свароч. пр-во. — 2008. — № 12. — С. 35–40.
11. Vairis A., Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy // Wear. — 1998, 217. — № 4. — P. 117–131.
12. Wilhelm H., Furian R., Moloney K. C. Linear friction bonding of titanium alloys for aeroengine application // Proc. 8th World conf. «Titanium '95: Sci. and technology», Birmingham, UK, 22–26 Oct., 1995. — London: Institute of Materials, 1996.
13. Mechanical properties and microstructure of linear friction welded TC4+TC17 joint / M. Tie-jun, S. Dong-gang, Z. Yong, Y. Si-qian // J. Aeronaut. Materials. — 2009. — 29(4). — P. 33–37.
14. Wanjara P., Jahazi M. Linear friction welding of Ti–6Al–4V: Proc., microstructure and mechanical property inter-relationships // Metallurgy and Material Transactions A. — 2005. — 36, № 8. — P. 2149–2164.
15. Vairis A., Frost M. Modeling the linear friction welding of titanium blocks // Material Sci. and Eng. A. — 2000. — 292. — P. 8–17.
16. Vairis A., Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V // Ibid. — 1999. — 271. — P. 477–484.
17. Vairis A., Frost M. Design and Commissioning of a friction welding machine // Materials and Manufacturing Proc. — 2006. — 21. — P. 766–773.
18. Зяхор И. В. Современное оборудование для сварки трением // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 48–52.
19. ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. — Взамен ГОСТ 19807–74. — Введ. 17.07.91. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 3 с.
20. Справочник металлста / А. Ю. Акимова, Б. Н. Арзамасов, И. А. Арутюнова и др.; под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. — М.: Машиностроение, 1976. — Т. 2. — 720 с.
21. Брун М. Я. Влияние фазового состава на термомеханическое упрочнение ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов // Цвет. металлы. — 1971. — № 12. — С. 53–56.
22. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.

Поступила в редакцию 14.06.2012

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ ТИТАНА В УЗКИЙ ЗАЗОР

И. В. ПРОТОВОКИЛОВ, В. Б. ПОРОХОНЬКО, Д. А. ПЕТРОВ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Цель работы заключалась в разработке техники электрошлаковой сварки в узкий зазор титановых заготовок толщиной 120 мм плавящимся мундштуком, исследовании технологических и металлургических особенностей процесса и формирования сварного соединения. Сварке подвергали заготовки технического титана ВТ1 размером 120×120×270 мм. Применяли плавящиеся мундштуки из технического титана с двумя каналами для электродных проволок диаметром 5 мм. В качестве шлака использовали флюс АН-Т4. Эксперименты осуществляли со стандартной величиной зазора между кромками — 30 мм и в узкий зазор — 22 мм. Анализировали режимы процессов сварки, термические циклы, макрошлифы сварных соединений и параметры жидкометаллической ванны. Результаты экспериментов показали, что уменьшение сварочного зазора приводит к увеличению скорости сварки на 13 %, снижению удельной погонной энергии процесса в среднем на 23 % и сужению зоны термического влияния. При этом проплавление свариваемых кромок снижается в среднем с 12 до 5,5 мм (на 54 %). Исследования параметров жидкометаллической ванны показали, что ширина ванны при электрошлаковой сварке в узкий зазор уменьшилась с 54 до 33 мм, при уменьшении глубины ванны с 22 до 19 мм. По результатам исследований разработана техника и рекомендованы режимы электрошлаковой сварки титана в узкий зазор, обеспечивающие стабильное протекание процесса с хорошим формированием сварного соединения, без непроваров, пор, трещин и прочих дефектов. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, узкий зазор, титан, термический цикл сварки, металл шва, макроструктура, сварочная ванна

Электрошлаковая сварка (ЭШС) является эффективным способом соединения конструкций из титана и титановых сплавов больших толщин [1–4]. Одним из ее главных преимуществ является высокая производительность и возможность соединения за один проход, без разделки кромок, металла толщиной 30...400 мм. При этом металл шва отличается высокой плотностью, отсутствием дефектов в виде микро- и макропор, несплавлений и пр. К технологическим преимуществам ЭШС титана также можно отнести относительную простоту и надежность используемого оборудования, несложную технику выполнения швов, дополнительное защитное и рафинирующее действие на жидкий металл шлака [1–3].

Недостатками ЭШС титановых сплавов, ограничивающими ее практическое применение, являются нежелательные структурные превращения в околошовной зоне под действием термического цикла сварки и формирование грубой, крупнозернистой структуры металла шва, что негативно влияет на эксплуатационные свойства сварных соединений.

В работе [5] показана целесообразность использования комплексных методов воздействия на процесс ЭШС, основанных на тепловых и гидродинамических механизмах управления формированием сварных соединений. Тепловые методы

могут базироваться на уменьшении погонной энергии сварки и перераспределении тепловыделения в объеме ванны, что позволяет снизить перегрев и неравномерность проплавления основного металла и тем самым исключить нежелательные структурные превращения в нем. Гидродинамические методы заключаются в бесконтактном силовом воздействии на сварочную ванну внешними магнитными полями с целью управления процессами теплопереноса и кристаллизации металла шва.

Управлять термическим циклом сварки при ЭШС достаточно сложно, поскольку данный процесс характеризуется большими погонными энергиями и объемами расплавленного шлака и металла. Одним из методов, позволяющих снизить погонную энергию сварки и уменьшить ширину зоны термического влияния (ЗТВ), является сварка в узкий зазор. Такие исследования проводили в 1970-е годы в СССР, Англии, Японии, США, Канаде и других странах [6–8]. Было показано, что сварка в узкий зазор характеризуется снижением объема шлаковой ванны, присадочного материала и увеличением скорости сварки.

По принятым для ЭШС сталей стандартам зазор между кромками в месте сварки для металла толщиной 81...160 мм должен составлять 30 мм, в нижней части кромок и 33...49 мм в верхней [9]. Такие размеры зазора приняты исходя из ус-

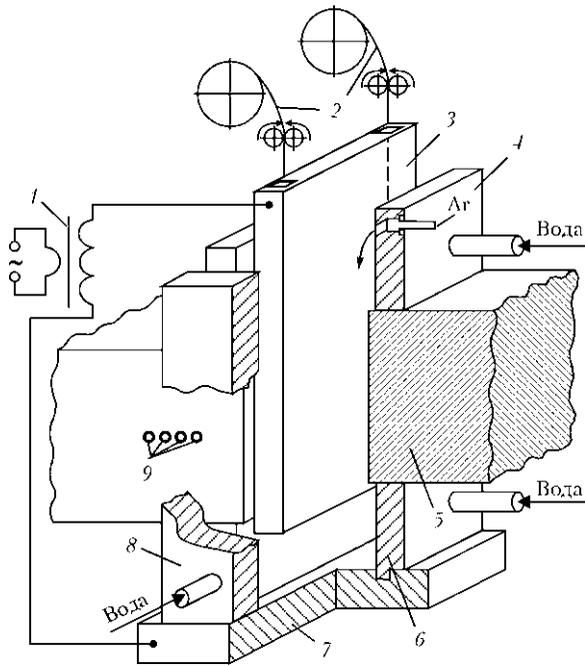


Рис. 1. Схема сборки образцов под ЭШС: 1 — источник питания; 2 — сварочная проволока; 3 — плавящийся мундштук; 4 — выводная водоохлаждаемая формирующая планка; 5 — свариваемый образец; 6 — входная водоохлаждаемая формирующая планка; 7 — поддон; 8 — боковое формирующее устройство; 9 — отверстия для термопар

ловий гарантированного проплавления свариваемых кромок и исключения возможности короткого замыкания электродов (плавящегося мундштука) на основной металл. Аналогичные зазоры 30...32 мм рекомендуют и при сварке титановых сплавов [1].

Возможность снижения сварочного зазора при ЭШС сталей до 19 ± 1 мм применительно к задачам мостостроения приведена в работе [8]. Отмечается, что новая технология ЭШС в узкий зазор обеспечивает улучшенные усталостные характеристики и ударную вязкость металла шва и ЗТВ. Указанные эффекты достигаются за счет снижения тепловложения, оптимизации формы метал-

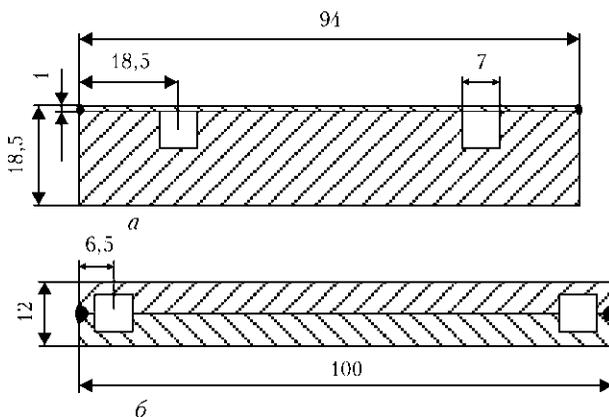


Рис. 2. Конструкция и геометрия плавящихся мундштуков, используемых при стандартном способе ЭШС (а) и при ЭШС в узкий зазор (б)

лической ванны, применения сварочной проволоки, улучшающей структуру металла.

Цель настоящей работы заключалась в разработке техники ЭШС в узкий зазор титановых заготовок толщиной 120 мм плавящимся мундштуком, исследовании технологических и металлургических особенностей процесса и формирования сварного соединения. Полученные результаты планируется использовать при проведении дальнейших исследований по ЭШС с внешними электромагнитными воздействиями.

Сварке подвергали заготовки из технического титана ВТ1 размером $120 \times 120 \times 270$ мм. Эксперименты проводили на установке А-1494, используя трансформатор ТШП-10000/1 (рис. 1). Применяли плавящиеся мундштуки из технического титана с двумя каналами для электродных проволок диаметром 5 мм. В качестве шлака использовали флюс АН-Т4. Сварку осуществляли со стандартным зазором между кромками 30 мм и в узкий зазор 22 мм. В первом случае в качестве входного и выходного карманов использовали привариваемые титановые накладки, во втором — медные водоохлаждаемые формирующие планки. Для исследования термического цикла сварки использовали термопары типа ХА, которые размещали в свариваемых образцах на расстоянии 30, 40, 50,

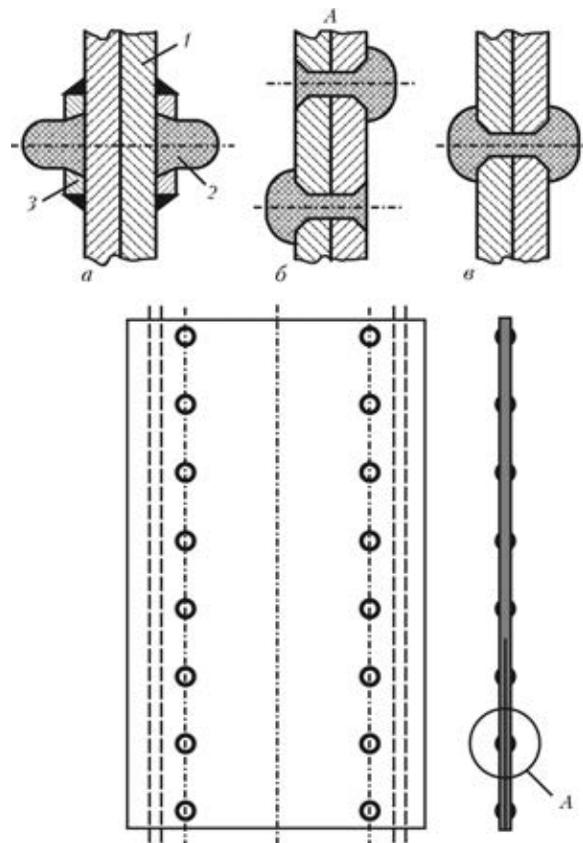


Рис. 3. Конструкции электроизоляторов плавящегося мундштука для ЭШС титана: а — прикрепленный изолятор; б, в — впрессованные (литые) изоляторы; 1 — плавящийся мундштук; 2 — электроизолятор; 3 — титановая шайба

Параметры ЭШС титановых заготовок ($\delta_{0,м} = 120$ мм)

Процесс	Размер зазора, мм	Сварочный ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Удельная погонная энергия сварки, кДж/см ²	Величина проплавления кромок, мм	Глубина жидкометаллической ванны, мм	Ширина жидкометаллической ванны, мм	Коэффициент формы ванны	Угол пересечения кристаллитов шва (см. рис. 9), град
Традиционная ЭШС	30	$\frac{3000...4000}{3500}$	$\frac{23...25}{24}$	2,2	$\frac{93...135}{114}$	$\frac{10...14}{12}$	22	54	2,5	120
ЭШС в узкий зазор	22	$\frac{2500...3500}{3000}$	$\frac{24...26}{25}$	2,5	$\frac{70...106}{88}$	$\frac{4...7}{5,5}$	19	33	1,7	160

60 мм от кромок. Горячие спаи термопар крепили в отверстиях в основном металле на глубине 20 мм с применением конденсаторной сварки. Для регистрации и обработки параметров процесса использовали программные пакеты LabView и PowerGraph. Из полученных сварных соединений изготавливали продольные и поперечные темплеты для анализа структуры металла, параметров швов и ЗТВ.

Как было отмечено выше, техника сварки в узкий зазор требует применения дополнительных мер, направленных на предотвращение короткого замыкания электродов на свариваемые кромки и гарантированное проплавление основного металла. С этой целью использовали плавящийся мундштук, конструкцию которого выбирали исходя из условий равномерного проплавления свариваемых кромок (рис. 2, б). Толщина мундштука была уменьшена до 12 мм, а каналы для электродных проволок смещены к краям мундштука для увеличения тепловыделения в районе водоохлаждаемых формирующих планок. Для предотвращения замыкания мундштука на свариваемые кромки, особенно при сварке протяженными швами, це-

лесообразно применение изоляторов, изготовленных из материала, аналогичного используемому флюсу (рис. 3). По мере оплавления мундштука изоляторы расплавляются, компенсируя расход шлака на формирование гарнисажной корки на поверхности шва. Изоляторы могут крепиться на мундштуке с помощью привариваемых титановых колец (рис. 3, а) или впрессовываться (залиться) в специальные отверстия в нем (рис. 3, б, в).

Параметры сварки и основные результаты исследований приведены в таблице и на рис. 4–9.

В обоих случаях (стандартная ЭШС и ЭШС в узкий зазор) электрошлаковый процесс был стабильным, без выбросов шлаковой ванны, коротких замыканий и дуговых разрядов. Швы имели блестящую, гладкую боковую поверхность (рис. 4). Макроструктура металла шва плотная, без шлаковых включений, пор, трещин и прочих дефектов (рис. 5, 6). Твердость *НВ* по высоте шва распределена равномерно. По ширине шва наблюдается увеличение твердости в зоне сплавления в среднем на 10 %.

Проплавление кромок основного металла в поперечном сечении при сварке в узкий зазор от-

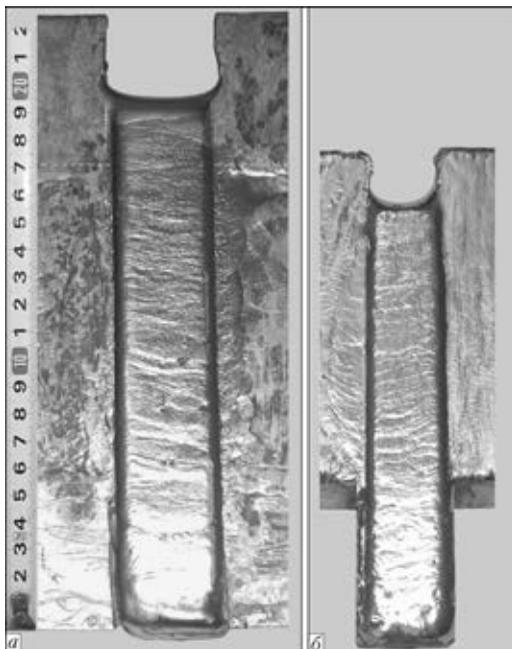


Рис. 4. Боковые поверхности сварных соединений, выполненных стандартной ЭШС (а) и ЭШС в узкий зазор (б)



Рис. 5. Макроструктуры сварных соединений (продольное сечение), выполненных стандартной ЭШС (а) и ЭШС в узкий зазор (б)



Рис. 6. Макроструктура сварного соединения (поперечное сечение), выполненного ЭШС в узкий зазор

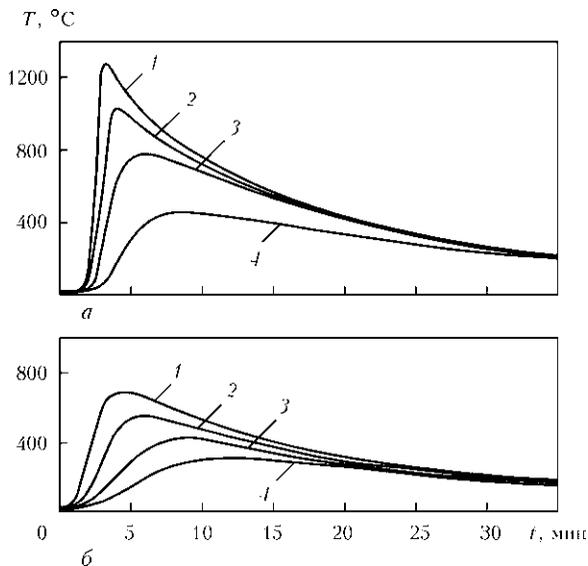


Рис. 7. Термические циклы стандартной ЭШС (а) и ЭШС в узкий зазор (б) для различных расстояний от свариваемой кромки: 1 — $l = 30$; 2 — 40; 3 — 50; 4 — 60 мм

носителем равномерное (рис. 6). Наблюдается незначительное снижение проплавления в центральной части шва (4 мм) по сравнению с периферийными участками (7 мм), что связано с тепловыделением в ванне, в месте плавления электродных проволок.

Результаты экспериментов показывают, что снижение сварочного зазора с 30 до 22 мм приводит к увеличению скорости сварки (производительности процесса) на 13 % и снижению удельной погонной энергии процесса в среднем на 23 %. При этом величина проплавления свариваемых кромок снижается в среднем с 12 до 5,5 мм (на 54 %). Указанные эффекты прежде всего достигаются за счет уменьшения объема наплавленного металла и оптимизации тепло-массообмена в ванне.

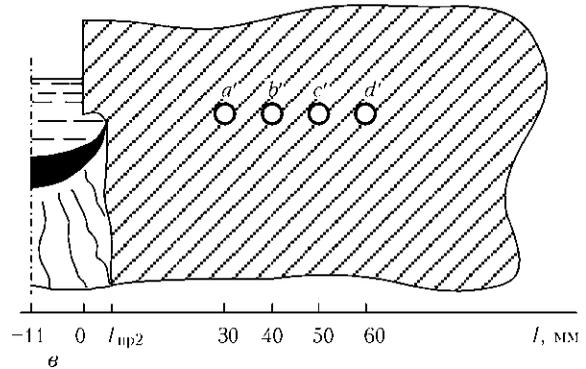
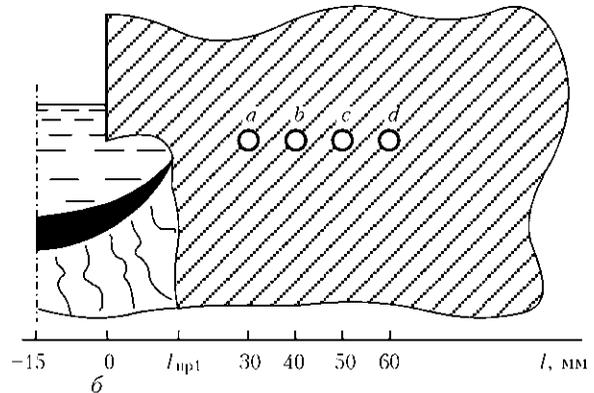
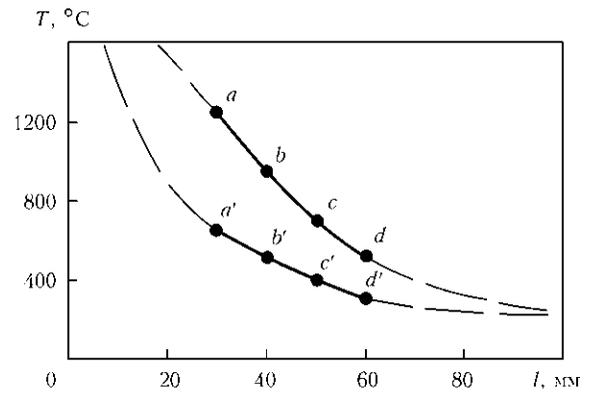


Рис. 8. Максимальные температуры в сварочном образце (а) в зависимости от расстояния до свариваемой кромки при стандартной ЭШС (б) и ЭШС в узкий зазор (в); $a-d$ ($a'-d'$) — точки, в которых расположены термопары

Анализ термических циклов сварки (рис. 7, 8) показывает, что при снижении сварочного зазора максимальная температура нагрева основного металла на расстоянии 30 мм от свариваемой кромки снижается с 1250 до 640 °С. Ширина зоны нагрева металла выше температуры, например, 840 °С (минимальная температура начала полиморфных превращений для $\alpha + \beta$ титановых сплавов [10]) при ЭШС в узкий зазор уменьшилась более чем в два раза (с 32 до 14,5 мм). Эффект сужения ЗТВ достигается за счет ряда факторов, прежде всего снижения удельной погонной энергии сварки и уменьшения объемов шлаковой и жидкометаллической ванн, а также увеличения скорости сварки. Данное обстоятельство снижает вероятность протекания процессов нежелательных структурных превращений в основном металле.

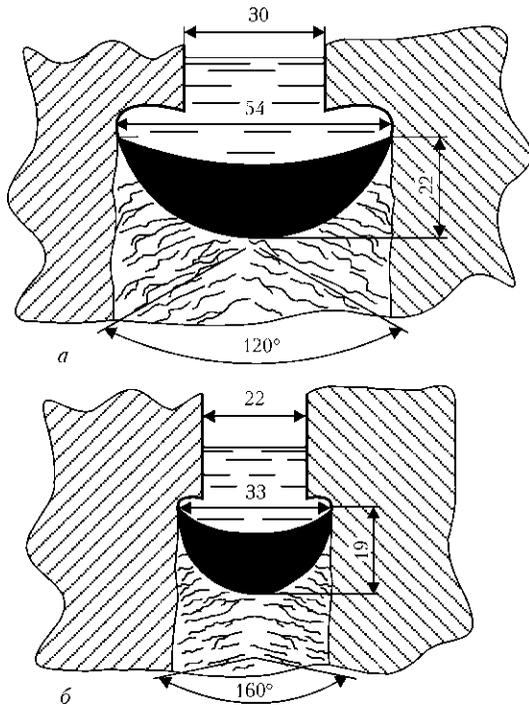


Рис. 9. Схема жидкометаллической ванны при стандартной ЭШС (а) и ЭШС в узкий зазор (б)

Исследования параметров жидкометаллической ванны показывают, что ширина ванны при ЭШС в узкий зазор уменьшилась с 54 до 33 мм при снижении глубины ванны с 22 до 19 мм. Соответственно коэффициент формы ванны снизился с 2,5 до 1,7, а угол пересечения кристаллитов по оси шва увеличился со 120 до 160° (рис. 9). Такие изменения коэффициента формы шва и направления роста кристаллитов могут негативно влиять на механические свойства сварных соединений, особенно по оси шва. Поэтому для переориентации направления роста кристаллитов необходимо снижать глубину металлической ванны, что может быть достигнуто, например, уменьшением напряжения сварки до 19...22 В.

Следует отметить, что одним только изменением режимов сварки невозможно управлять кристаллизацией наплавленного металла таким образом, чтобы достичь формирования шва с однородной мелкозернистой структурой. Кроме того, чрезмерное снижение зазора и погонной энергии сварки может привести к нестабильности проплавления основного металла и самого процесса сварки. Для этого необходимо использование дополнительных механизмов воздействия на тепломассоперенос в сварочной ванне и кристаллизацию металла шва, в частности, путем использования внешних магнитных полей [2, 5]. Такие исследования с применением импульсных элек-

тромагнитных воздействий планируется провести в дальнейшем.

Выводы

1. Показано, что можно уменьшить сварочный зазор до 22 мм при ЭШС плавящимся мундштуком титановых заготовок толщиной 120 мм.

2. Разработаны техника и режимы ЭШС титана в узкий зазор, обеспечивающие стабильное протекание электрошлакового процесса с хорошим формированием сварного соединения, без непроваров, пор, трещин и прочих дефектов.

3. Установлено, что уменьшение сварочного зазора с 30 до 22 мм приводит к увеличению скорости сварки (производительности процесса) на 13 % и снижению удельной погонной энергии сварки в среднем на 23 %. При этом ширина жидкометаллической ванны снижается с 54 до 33 мм, а глубина — с 22 до 19 мм.

4. Снижение погонной энергии при ЭШС в узкий зазор приводит к уменьшению ширины ЗТВ и снижает вероятность протекания нежелательных структурных превращений в основном металле.

5. Формирование при ЭШС грубой, крупнозернистой структуры металла шва, снижающей механические свойства сварного соединения, требует применения дополнительных механизмов воздействия на кристаллизацию металла, которые могут быть основаны на использовании внешних магнитных полей.

1. *Электрошлаковая сварка титановых сплавов* / Я. Ю. Компан, В. Ф. Грабин, М. А. Абралов и др. — Ташкент: Фан, 1975. — 84 с.
2. *Компан Я. Ю., Щербинин Э. В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
3. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
4. *Замков В. Н., Лычко И. И., Топольский В. Ф.* ЭШС плит из титанового сплава Grade 5 // Автомат. сварка. — 1999. — № 9. — С. 73–75.
5. *Протоковилив И. В., Порохонько В. Б.* Управление формированием сварных соединений при ЭШС (Обзор) // Там же. — 2012. — № 10. — С. 54–60.
6. *Электрошлаковая технология за рубежом* / Б. И. Медовар, А. К. Цыгуленко, А. Г. Богаченко, В. М. Литвинчук. — Киев: Наук. думка, 1982. — 320 с.
7. *Berkovich I.* Going up faster with narrow-gap electros slag // Weld. Eng. — 1971. — № 11. — Р. 44–45.
8. *Krishna K.* Narrow-gap improved electros slag welding for bridges // Welding in the World. — 1996. — 38, № 11. — Р. 325–335.
9. *ГОСТ 30482–97.* Сварка сталей электрошлаковая. Требования к технологическому процессу. — Изд-во стандартов, 2001.
10. *Ильин А. А., Колачёв Б. А., Польшкин И. С.* Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.

Поступила в редакцию 15.10.2012



УСТРОЙСТВА ВВОДА ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ (Обзор)

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, М. В. МИРОНОВА, С. В. ЯРМОНОВ

Приазовский государственный технический университет МОН Украины.

Украина, г. Мариуполь, пер. Республики, 7. E-mail: gefest@pstu.edu

При дуговой сварке и наплавке перспективно применение управляющих продольных и поперечных магнитных полей, позволяющих повысить производительность расплавления электродной проволоки, измельчить структуру металла шва (наплавленного валика) и уменьшить глубину проплавления основного металла. При дуговой сварке и наплавке в основном определяли влияние поперечных магнитных полей на геометрические размеры швов (валиков) и производительность расплавления электрода. При этом в работах либо не приводятся конструкции устройств ввода, либо они даются без обсуждения вопроса об оптимальности принятых конструктивных решений, а также размеров каждого элемента этих устройств. Целью настоящей работы явился анализ известных конструкций устройств ввода для оценки эффективности применения их в процессах дуговой сварки и наплавки. Показано, что приведенные в работах устройства представляют собой электромагнит с П-образным ферросердечником с воздушным зазором и обмотками. В некоторых работах измеряли только поперечную компоненту магнитного поля B_x и не измеряли продольную компоненту индукции B_z , которую индуцировали применявшиеся устройства ввода. Однако на форму и размеры сечения швов и наплавленных валиков в этом случае могла влиять не только поперечная B_x , но и продольная компонента магнитного поля B_z . Проанализированы особенности конструкций, а также распределение компонент индукций B_x , B_z , которые генерируют известные схемы устройства ввода поперечных магнитных полей в зоне сварочной дуги и ванны, отмечены их недостатки. Показана актуальность разработки новых схем, а также целесообразность оптимизации конструктивных размеров известных схем устройств для повышения эффективности дуговой сварки и наплавки с воздействием поперечных магнитных полей. Библиогр. 15, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая сварка и наплавка, продольное и поперечное магнитное поле, индукция магнитного поля, устройство ввода поперечного магнитного поля

Применение при дуговой сварке и наплавке продольных (ПРМП) и поперечных магнитных полей (ПОМП) в основном позволяет повышать производительность расплавления электродной проволоки, измельчать структуру металла шва (наплавленного валика) и уменьшать глубину проплавления основного металла. Следует отметить, что во всех работах, в которых при дуговой сварке и наплавке используют ПРМП либо ПОМП принято, что продольная компонента индукции B_z направлена вдоль оси электрода, а поперечная компонента индукции B_x (либо B_y) — перпендикулярно к оси электрода, т. е. расположена в плоскости наплавляемого изделия (пластины).

В работах [1, 2] рассмотрены устройства ввода (УВ) ПРМП, представляющие собой соленоид с ферромагнитным сердечником, наличие которого значительно увеличивает продольную компоненту индукции в зоне сварочной дуги и жидкого металла ванны. Применительно к режимам дуговой сварки и наплавки с воздействием ПРМП в работе [3] рассчитаны оптимальные размеры соленоида с круглым ферромагнитным сердечником с отверстием для прохождения сварочной проволоки.

Данные о конструкциях УВ ПОМП для процессов дуговой сварки и наплавки немногочис-

ленны. В некоторых статьях, посвященных в основном рассмотрению влияния ПОМП на геометрию швов (валиков) при дуговой сварке (наплавке), сведения об использованных конструкциях УВ ПОМП не приводятся. Вопрос их оптимального применения в большинстве работ не обсуждался. Рассмотрим более подробно существующие конструкции УВ ПОМП применительно к дуговой сварке и наплавке плавящимся электродом.

Следует отметить, что в работах [4–9] исследованы различные аспекты процессов сварки и наплавки с воздействием ПОМП, но в них не приведены данные о применявшихся конструкциях УВ ПОМП. В работах [10–15] рассмотрены УВ ПОМП, построенные по одной и той же схеме — электромагнит с П-образным ферросердечником с воздушным зазором и обмотками.

В одной из первых работ, посвященной исследованию влияния переменного ПОМП на геометрию стыковых швов при сварке стали Ст.3 проволокой Св-08А под флюсом АН-348А, показано, что для создания ПОМП использован специальный электромагнит, который крепился к автомату АДС-1000 [10]. Установлено, что при переходе от пластины без разделки к пластине с разделкой магнитная индукция снижалась в 4...7 раз. Применение ПОМП при дуговой наплавке под флюсом способствовало снижению глубины проплавления на 10...50 % и

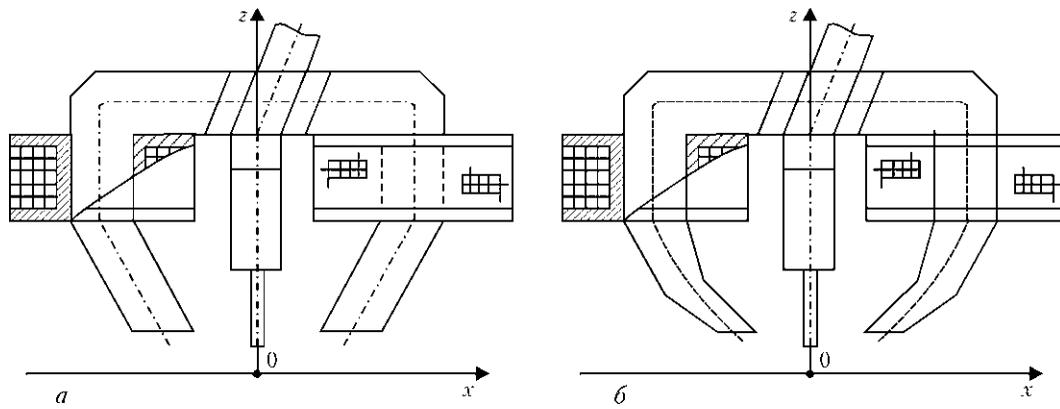


Рис. 1. Схема электромагнитов с постоянным (а) и переменным (б) сечением полюсов [11]

увеличению ширины шва на 20...25 %. Однако в этой работе не приведена конструкция применявшегося УВ ПОМП.

В работе [11] рассмотрено УВ ПОМП в виде П-образного электромагнита с двумя катушками, размещенными на стержнях с постоянным (рис. 1, а) и переменным (рис. 1, б) сечением полюсов, применительно к сварке проволокой Св-08ГА постоянным током под флюсом АН-348А кольцевых поворотных стыков стальных труб (толщина стенки 11...12 мм).

Установлено, что качественное формирование швов обеспечивалось при количестве 3000...7500 ампер-витков и сечении магнитопровода 25×25 мм с воздушным зазором между полюсами 20...30 мм. Данное устройство с электромагнитами постоянного сечения обеспечивало при равных условиях большую индукцию магнитного поля, чем устройство со стержнями переменного сечения, сужающимися в направлении к полюсам. Заметим, что в этой работе в зоне стыка измеряли только поперечную компоненту магнитного поля B_x . Однако в этой же зоне значительна величина продольной компоненты индукции B_z , которая не из-

мерялась. На форму швов в этом случае могла влиять не только поперечная, но и продольная компонента индукции магнитного поля.

В работе [12] приведено УВ ПОМП для наплавки цилиндрических образцов диаметром 76 мм из стали 45, представляющее собой электромагнит с П-образным сердечником (рис. 2), которое использовали при наплавке под флюсом проволокой Нп-30ХГСА. Показано, что при воздействии ПОМП изменяется коэффициент расплавления электродной проволоки. Однако данное устройство применяется только при наплавке узлов цилиндрической формы и не применяется для наплавки плоских изделий. Еще одним недостатком такого устройства ввода является ограничен-

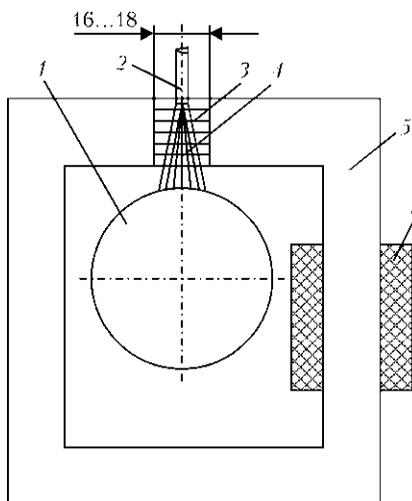


Рис. 2. Схема УВ ПОМП в зону горения сварочной дуги [12]: 1 — наплавляемый образец; 2 — электродная проволока; 3 — магнитные силовые линии; 4 — столб сварочной дуги; 5 — сердечник электромагнита; 6 — катушка

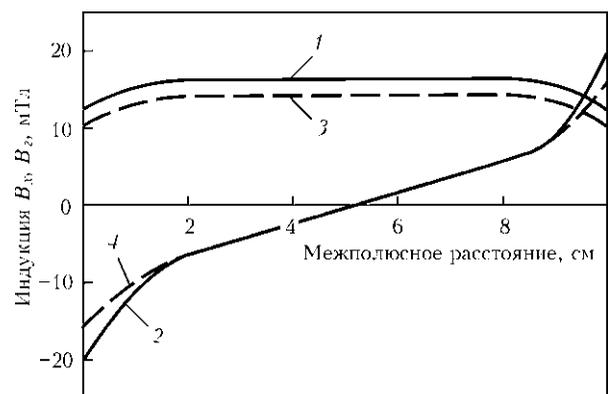
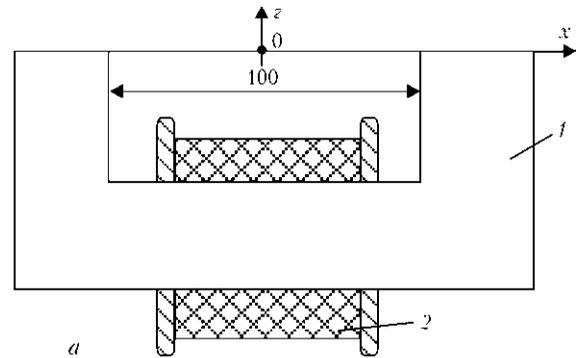


Рис. 3. Схема электромагнитного устройство ввода (а) и распределение индукции между его полюсами (б): 1, 3 — B_x ; 2, 4 — B_z ; 1, 2 — $y = 0$; 3, 4 — 10 мм

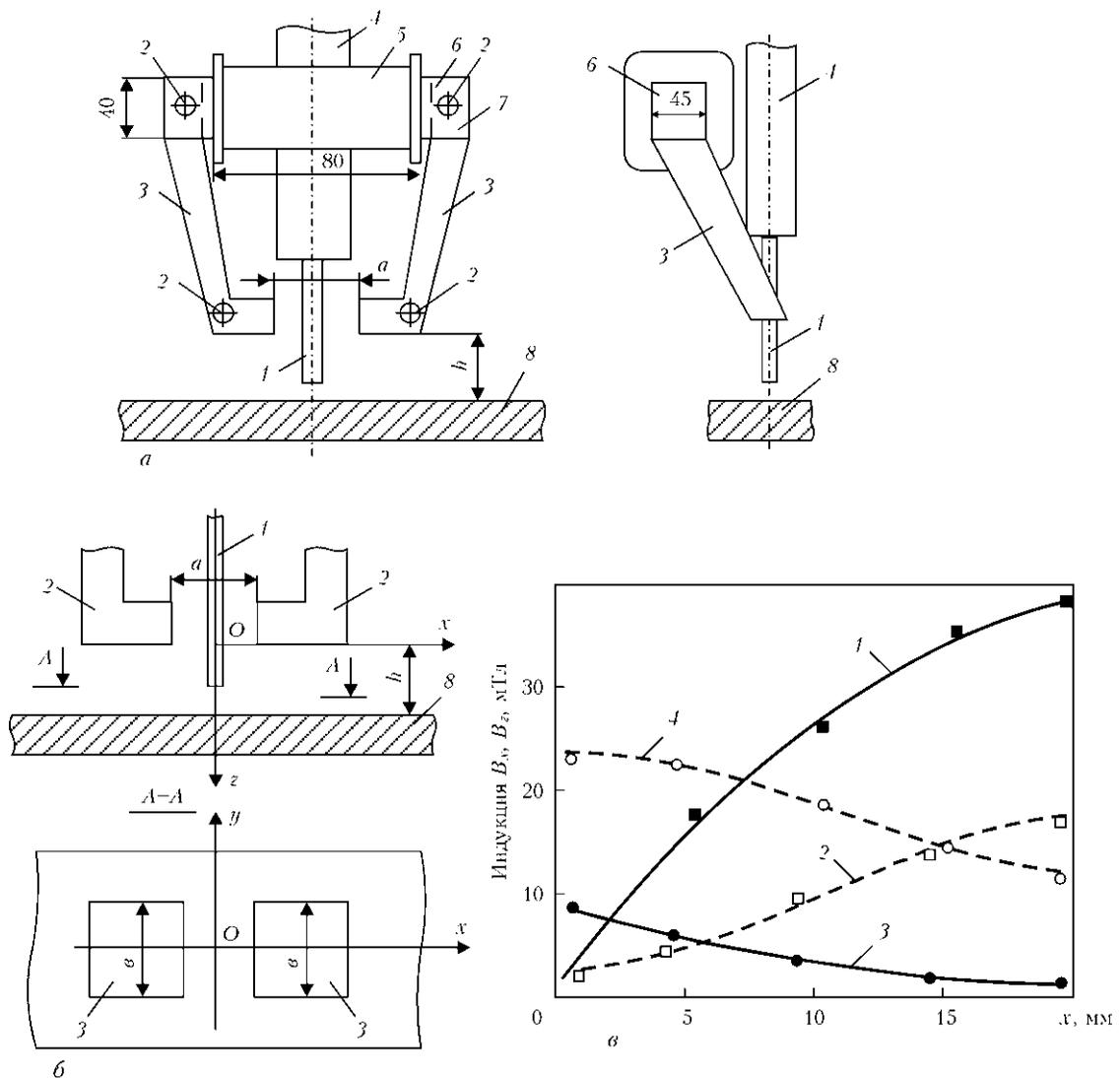


Рис. 4. Схема устройства для создания ПОМП (а), система координат при измерении индукции магнитного поля (б) (обозначения см. в тексте) и распределение компонент индукции B_z, B_x ПОМП в направлении оси Ox (б) [14]: 1, 2 — индукция B_z ; 3, 4 — индукция B_x ; 1, 3 — изделие-ферромагнетик; 2, 4 — изделие из немагнитного материала ($y = 0$; $h = 20$ мм; $Iw = 1920$)

ный диаметр изделий, восстанавливаемых путем наплавки.

В работе [13] для воздействия на дугу ПОМП при наплавке проволокой под флюсом применяли устройство, состоящее из П-образного магнитопровода 1 (сталь 45) и катушки из изолированной медной проволоки 2 (количество витков $w = 120$) (рис. 3, а). Наплавляемые пластины из немагнитной стали 1218Н10Т толщиной 15...20 мм укладывали на полюса этого П-образного магнитопровода. При такой конструкции устройства ввода поперечная компонента индукции магнитного поля B_x вдоль центральной части между полюсами (у поверхности наплавляемой пластины) распределялась равномерно и была больше, чем нормальная компонента индукции B_z (рис. 3, б). Показано, что воздействие знакопеременного ПОМП приводит к расширению наплавленных валиков. При частоте 50 Гц ПОМП расширение валика

происходит пропорционально индукции B_x . Однако такая конструкция УВ ПОМП может быть использована для исследовательских целей и только для сварки немагнитных материалов и сплавов.

В работе [14] представлено устройство (рис. 4, а), состоящее из магнитопровода 7, собранного из листов электротехнической стали, каркаса катушки 5 с количеством витков $w = 480$, расположенной на магнитопроводе 6. Стержни магнитопровода 3 (сечение 25×25 мм) имели зазор шириной a , через который проходила электродная проволока 1. Стержни магнитопровода соединены болтами 2. Устройство крепили к мундштуку 4 сварочного автомата с помощью хомутов (на рис. 4, а не показаны).

Установлено, что тангенциальная компонента индукции B_x у поверхности ферромагнитной пластины максимальна в центре системы и умень-

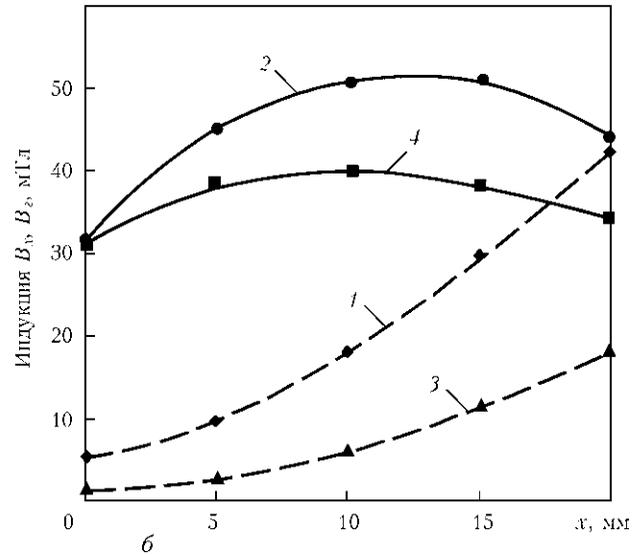
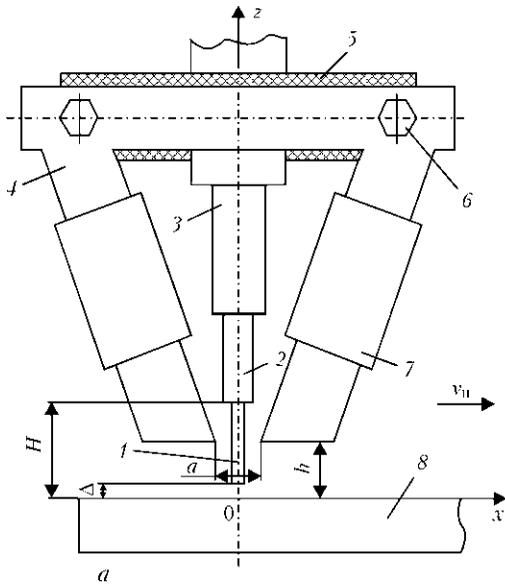


Рис. 5. Схема устройства для создания ПОМП (а) (обозначения см. в тексте) и распределение компонент индукции B_z , B_x ПОМП вдоль оси Ox ($z = 0$, $y = 0$, $I_k = 60$ А) [15]: 1, 3 — индукция B_z ; 2, 4 — индукция B_x ; 2 — постоянное ПОМП; 3, 4 — переменное ПОМП частотой 50 Гц

шается от оси электрода к полюсам электромагнита (рис. 4, в). Наличие ферромагнитного изделия значительно (примерно в 4-6 раз) снижает B_x и увеличивает нормальную составляющую индукции B_z у поверхности ферромагнетика (см. рис. 4, в), что связано с ослабляющим действием ферромагнетиков на касательную (поперечную) компоненту индукции ПОМП.

В работе [15] для создания управляющего ПОМП разработано устройство, схема которого приведена на рис. 5, а. Устройство представляет собой магнитопровод 4, состоящий из трех участков. Два наклонных участка, на которых размещены катушки 7, а также горизонтальный участок, соединенный с наклонными с помощью болтовых соединений 6. Магнитопровод собран из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Сечение набора 30×20 мм. Количество витков одной катушки составляло $w = 70$. Устройство, генерирующее ПОМП, крепилось к сварочному автомату типа АДС-1002 с помощью хомутов. При этом магнитопровод 4 был изолирован от автомата изолятором 5. С помощью автомата можно изменять параметр H (вылет электрода), т. е. расстояние между токоподводящими губками 2 и пластиной 8, а также расстояние h от торцов магнитопровода 4 до поверхности пластины 8. Конструкция устройства позволяла изменять расстояние между нижними участками магнитопровода у торца электрода (параметр a). Электродная проволока 1 проходила через мундштук 3 (на рис. 5, а приведена система координат, принятая для исследования магнитного поля, при этом начало координат располагалось на поверхности пластины под осью электрода).

При измерениях индукции ПОМП выдерживали постоянными расстояние от торца электрода до поверхности пластины $\Delta = 5$ мм, величину вылета электрода $H = 25$ мм, параметр $h = 25$ мм, расстояние между нижними торцами магнитопровода по горизонтали $a = 35$ мм. При исследовании индукции магнитного поля использовали проволоку Св-12Х18Н10Т диаметром 4 мм, а в качестве основного металла — пластины из стали 12Х18Н10Т.

Распределение индукции B_z постоянного и переменного ПОМП частотой 50 Гц носит возрастающий характер по мере удаления от оси Oz к полюсам устройства по оси Ox (рис. 5, б, кривые 1, 3). Характерно, что в зоне под торцом электрода компонента индукции B_z значительно меньше, чем компонента B_x (рис. 5, б, кривые 2, 4). Кроме того, при протекании постоянного тока в катушках УВ ПОМП компонента индукции B_x больше, чем при протекании переменного тока частотой 50 Гц. Это, по-видимому, обусловлено тем, что при использовании переменного тока частотой 50 Гц в магнитопроводе устройства имеют место потери на токи Фуко и петлю гистерезиса.

Следует отметить, что приведенные на рис. 4, в и 5, б данные о характере распределения индукции B_x вдоль оси Ox различны. Это связано, на наш взгляд, с влиянием формы концов стержней УВ ПОМП на распределение индукции B_x вдоль оси Ox . В рассмотренных статьях этот вопрос не обсуждался и требует дальнейшего изучения.

Учитывая данные работы [14] о том, что при наличии изделия из ферромагнитной стали продольная компонента индукции B_z в зоне сварочной



ванны практически на порядок больше, чем поперечная компонента индукции B_x ПОМП (см. кривые 1, 3 на рис. 4, в), можно полагать, что установленные в работах [10–12] эффекты влияния ПОМП на геометрические размеры сечений швов и наплавленных валиков обусловлены воздействием не только поперечной, но и продольной компоненты индукции ПОМП.

Таким образом, ранее опубликованные работы по исследованию влияния ПОМП на геометрические размеры швов при дуговой сварке и наплавке не учитывали особенности конструкции УВ ПОМП. Эта задача представляется актуальной применительно к процессам дуговой сварки и наплавки.

1. *Сварка с электромагнитным перемешиванием* / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман и др. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. *Черныш В. П., Кухарь С. Н.* Оборудование для сварки с электромагнитным перемешиванием. — Киев: Вища шк., 1984. — 56 с.
3. *Размышляев А. Д., Маевский В. Р., Сидоренко С. М.* Расчет индукции магнитного поля соленоида с ферромагнитным сердечником применительно к дуговой наплавке // *Автомат. сварка.* — 2001. — № 8. — С. 22–24.
4. *Демшинский Ю. А., Дятлов В. И.* Магнитное управление при газозлектрической сварке плавящимся электродом // Там же. — 1963. — № 4. — С. 82–83.
5. *Акулов А. И., Копаев Б. В.* Магнитное управление дугой при сварке плавящимся электродом в аргоне // Там же. — 1972. — № 7. — С. 39–42.
6. *Измельчение структуры металла шва при сварке дугой, колеблющейся в поперечном магнитном поле* / А. М. Болдырев, Ю. С. Ткаченко, Н. П. Толоконников и др. // Там же. — 1975. — № 7. — С. 70–71.
7. *Магнитное управление формированием шва при автоматической сварке под флюсом* / Ю. Г. Гаген, И. В. Перун, С. Т. Добровольский и др. // Там же. — 1975. — № 11. — С. 73–74.
8. *Демянцевич В. П., Лебедев Г. А., Максимец Н. А.* Влияние внешнего магнитного поля и параметров режима сварки на формирование сварных швов // *Свароч. пр-во.* — 1975. — № 11. — С. 7–9.
9. *Размышляев А. Д.* Управление геометрическими размерами шва при дуговой сварке и наплавке воздействием магнитных полей (Обзор) // Там же. — 1994. — № 9. — С. 28–31.
10. *Шейкин М. З., Шмелева И. А., Варяхов Н. Ф.* Применение магнитных колебаний при сварке под флюсом // Там же. — 1969. — № 6. — С. 24–25.
11. *Пацкевич И. Р., Зернов А. В., Иванцов В. Я.* Распределение индукции наведенного магнитного поля в зоне горения сварочной дуги // Там же. — 1970. — № 2. — С. 9–10.
12. *Влияние внешнего электромагнитного поля на скорость плавления электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом* / П. А. Иофинов, В. С. Ибрагимов, А. К. Дмитриенко и др. // Там же. — 1991. — № 1. — С. 34–35.
13. *Размышляев А. Д., Маевский В. Р.* Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом // *Автомат. сварка.* — 1996. — № 2. — С. 17–19.
14. *Размышляев А. Д.* Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке. — Мариуполь: ПГТУ, 2000. — 245 с.
15. *Размышляев А. Д., Миронова М. В.* Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля // *Автомат. сварка.* — 2011. — № 5. — С. 48–51.

Поступила в редакцию 24.10.2012

III Международная специализированная выставка ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

12–14 марта 2013 г.

Санкт-Петербург, Россия

Выставка BLECH Russia — это единственная в России выставка, полностью посвященная оборудованию и технологиям для обработки листового металла.

Производство и обработка листового металла в XXI веке является необходимым элементом функционирования автомобильной, судостроительной и аэрокосмической промышленности, производства бытовой техники. Широко используется листовый металл в отоплении, вентиляции и многих других секторах гражданского строительства.

Выставка BLECH Russia входит во всемирно известный сетевой проект BLECH. Проект включает целое семейство специализированных мероприятий, крупнейшее из которых — EuroBlech (Германия) — выставка номер один в мире по оборудованию и технологиям для обработки листового металла.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ТОКОВЕДУЩЕЙ ПРОВОЛОКОЙ НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ РАСПЫЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ

Г. М. РУСЕВ¹, А. Г. РУСЕВ¹, В. В. ОВСЯННИКОВ¹, О. Г. БЫКОВСКИЙ², А. Н. ПАСЬКО²

¹НПП «Плазматех». Украина, 69000, г. Запорожье, ул. Гоголя, 4;

²Запорожский национальный технический университет МОН Украины.

Украина, 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: root@zstu.zaporizhe.ua

Установлена связь между параметрами режима плазменного напыления токоведущей проволокой и фракционным составом распыляемых частиц, производительностью процесса и прочностными характеристиками покрытия. Распыляли проволоку Нп65Г с помощью плазматрона «Орнитоф-5М» в сосуд, наполненный водой, собранные капли просеивали. Установлено, что при заглублении катода от 0 до 1,5 мм и расстоянии катод-анод от 8 до 14 мм, сварочном токе 120...220 А, расходе аргона в пределах 15...37,5 л/ч, расходе воздуха в пределах 12...22,5 м³/ч плазменное покрытие в основном формируется из фракций размерами 0,315...0,1 мм. Распыляемые частицы движутся с различной скоростью в центре и на периферии плазменного потока, так что преимущественное их количество переносится периферийной частью потока. Дистанция напыления изменялась в пределах 40...150 мм, на оптимальном расстоянии 100 мм содержание элементов в поверхностном слое составило 0,4...0,43 % С, 0,7...0,77 % Mn, 0,17% Si, остальное — Fe. Производительность процесса составляет 0,8...1,1 г/с, прочность сцепления покрытия на дистанции напыления 90...100 мм 80 МПа, твердость *HV* 220...240, пористость 1...2 %. Послойное удаление более мелких и пылевидных фракций быстровращающейся металлической щеткой повышает когезионную прочность на 25...30 %. На оптимальных параметрах режима: $d_s = 1,2...1,6$ мм; $I_{св} = 170$ А; $U_d = 65$ В; $Q_{Ar} = 30$ л/мин; $Q_{возд} = 16,5$ м³/ч; дистанция напыления 100 мм, проволоками марок Нп65Г, ПП-100Х15М2Г2Р напыляют износостойкие покрытия на детали энергетического и металлургического оборудования. Библиогр. 2, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: плазменное напыление, распыляемые частицы, токоведущая проволока, фракционный состав, параметры режима, прочность сцепления, производительность

Плазменное напыление токоведущей проволокой может выполняться в широких диапазонах технологических параметров в зависимости от конструкции плазматрона. Изменение параметров влияет на фракционный состав напыляемых частиц и степень их окисления, количество переносимого ими тепла, температуру подложки (изделия), термический цикл нанесенного покрытия, его прочность, плотность, а также производительность самого процесса.

Исследования проводили с использованием плазматрона марки «Орнитоф-5М» [1] по схеме, приведенной в [2]. Проволоку марки Нп65Г диаметром 1,2 мм распыляли в наполненный водой сосуд диаметром 250 мм с дистанции 320 мм. Образовавшиеся капли (фракции) извлекали из сосуда, просушивали и просеивали в ситах с ячейками 2,5; 1,6; 1,0; 0,63; 0,4; 0,315; 0,2; 0,16; 0,1; 0,063; 0,05 мм.

Важными параметрами плазматрона, влияющими на режим плазменного напыления, являются заглубление катода и расстояние катод-анод, определяющие напряжение на дуге. Пределы их изменения приведены на рис. 1.

Распыление производили при токах 160 и 170 А, другие параметры принимали такими: расход аргона $Q_{Ar} = 30$ л/мин, расход воздуха $Q_{возд} = 16,5$ м³/ч. Время распыления составило 100 с. Установлено, что при изменении заглубления катода от 0 до 1,5 мм напряжение на дуге возрастает от 60 до 66 В при токе 170 А и от 59 до 63 В при токе 160 А. Производительность распыления составляет 1 г/с при токе 170 А и 0,8...0,84 г/с

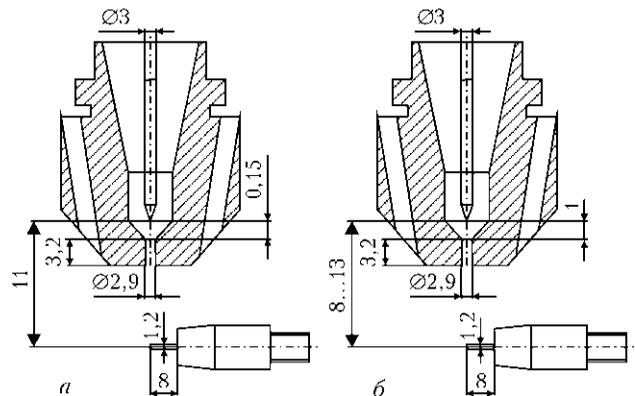


Рис. 1. Схема вариантов межэлектродных промежутков: а — заглубление катода (катодный узел); б — расстояние катод-анод (анодный узел)



Результаты экспериментальной оценки влияния технологических параметров напыления на фракционный состав распыляемого металла, %

Параметр	Размер фракции, мм					
	2,5...0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	<0,1 и пыль
Заглубление катода	4...8	8...10	26...28	15...16	20...24	12...13
Расстояние катод-анод	5	6...8	24...26	18...19	22...23	12...13
Сварочный ток	5...8	34...23	18...13	18...22	10...15	7...9
Расход воздуха	5...4	9...10	30...29	16...17	19...20	7...12
Расход аргона	4...3	12...8	25...28	16...17	23...24	14...10

при токе 160 А, а угар составляет соответственно 18...22 и 15...20 %.

Фракционный состав капель почти не зависит от изменения тока и находится в определенных пределах по мере возрастания параметров (таблица).

Для анодного узла плазмотрона установлено, что при изменении расстояния катод-анод от 8 до 14 мм напряжение на дуге возрастает от 54 до 69 В при токе 170 А и от 52 до 67 В при токе 160 А. Производительность распыления возрастает от 0,83 до 1 г/с при токе 170 А, для тока 160 А этот показатель несколько ниже и лежит в пределах 0,74...0,94 г/с, потери металла на угар выше при токе 170 А (16...22 %), а при токе 160 А они достигают 15...16 %. Фракционный состав изменяется мало и находится в тех же пределах, что и для заглубления катода (таблица). По результатам испытаний принято, что для токов 160...170 А заглубление катода должно составлять 0,5 мм, а расстояние катод-анод рекомендовано выбирать в пределах 9...11 мм, при этом сохраняется высокая стабильность процесса.

При этих параметрах исследовали влияние сварочного тока, который изменялся в пределах 120...220 А.

Установлено, что по мере увеличения сварочного тока производительность и потери на угар возрастают соответственно от 0,6 до 1,15 г/с и от 8 до 14 %. Твердость напыленного слоя на образце-свидетеле снижается с *HV* 278 до 222, что может быть связано с повышенным выгоранием углерода и легирующих элементов. Фракционный состав напыляемых частиц изменяется в ту или иную сторону (таблица), при этом содержание фракции размером 0,315 мм имеет тенденцию к снижению, хотя она остается самой крупной составляющей.

При визуальном наблюдении плазменного потока было замечено, что частицы движутся с различной скоростью в центре и на периферии, что, очевидно, связано с их разной массой. Для исследования этого явления использовали четыре стеклянных сосуда, наполненных водой. Сосуды диаметром 40, 65, 90 и 250 мм были вставлены один в другой. Расстояние от плазмотрона до

уровня поверхности воды составило 320 мм, а сварочный ток изменяли от 120 до 200 А. Установлено, что масса фракций в центральной части (сосуд диаметром 40 мм) с повышением тока возрастает от 16 до 24 г или несколько снижается (сосуд диаметром 90 мм) от 20 до 11 г, а в периферийной части (сосуд диаметром 250 мм) существенно возрастает — от 22 до 35 г.

Это свидетельствует о преимущественном переносе напыляемого материала периферийной частью плазменного потока. Фракционный состав частиц также изменяется по сечению плазменного потока. Так, содержание крупных частиц 0,2 мм в центре составляет 33...37 %, а на периферии снижается до 17...24 %. Фракции размером 0,315; 0,16; 0,1 мм составляют 15...18 % в центре потока, а на периферии их содержание снижается до 11...14 %. С повышением тока количество фракции 0,1 при 0,16 мм увеличивается до 18...25 %, а при 0,315 мм снижается до 8...10 %. Крупные фракции 0,4 мм, фракции менее 0,1 мм и пыль составляют 1...6 % в центре потока и 6...9 % на периферии. С повышением сварочного тока содержание крупных фракций несколько снижается, а мелких возрастает до 20...23 %.

Масса переносимых частиц существенно зависит от расхода плазмообразующего и транспортирующего газов. Степень окисления распыляемых частиц, их скорость и фокусировка, напряжение также будут зависеть от расхода этих газов.

Исследование проводили на токах 160...170 А, причем вначале изменяли расход воздуха при постоянном расходе аргона, а потом расход аргона при неизменном расходе воздуха.

При увеличении расхода воздуха напряжение возрастает от 60 до 64 В, при этом производительность достигает максимума 0,9 г/с.

При увеличении расхода воздуха в пределах 12...22,5 м³/ч фракционный состав частиц меняется мало (таблица). При расходе воздуха менее 12,5 м³/ч происходит повышенный нагрев сопла, что может привести к его быстрому выходу из строя.

В качестве оптимального был принят расход воздуха 15...17 м³/ч. При увеличении расхода аргона от 15 до 37,5 л/мин производительность про-

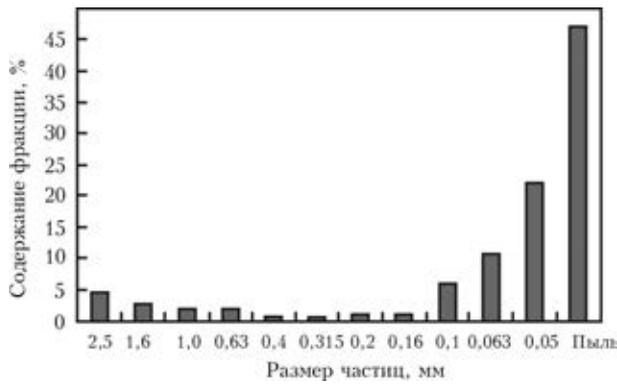


Рис. 2. Фракционный состав напыленных частиц, послойно удаленных с поверхности изделия

цесса возрастает от 0,82 до 1,02 г/с, причем при расходе аргона 30 л/мин снижается до 0,73 г/с ($Q_{\text{Ar}} = 37,5$ л/мин при токе 160 А). При сварочном токе 170 А производительность возрастает с 0,96 до 1,09 г/с при расходе аргона 20 л/мин, после чего снижается до 0,85 г/с при расходе аргона 37,5 л/мин.

Замечено, что при расходе аргона менее 30 л/мин имеет место более интенсивный нагрев сопла и повышенный расход вольфрамового электрода, что определило в качестве оптимального значения расход аргона 30 л/мин. Стабильность плазменного процесса оказалась выше при сварочном токе 170 А. Фракционный состав частиц практически не изменяется (см. таблицу). Производительность при этом составляет 0,98...1,0 г/с.

Поскольку при плазменно-дуговом напылении частицы разогреваются до температур, значительно превышающих температуру плавления, а их движение происходит в аргонно-воздушной среде, они непрерывно взаимодействуют с кислородом и азотом воздуха, в результате чего состав исходного материала, нанесенного на подложку, изменяется. Степень взаимодействия металла с газовой средой в значительной степени будет зависеть от дистанции напыления.

Дистанцию напыления изменяли в пределах от 40 до 150 мм, остальные параметры режима плазменного напыления были постоянными: диаметр электрода 1,2 мм, сварочный ток 170 А, напряжение на дуге 65 В, расход аргона 30 л/мин, расход воздуха 16,5 м³/ч.

Установлено, что наибольшая прочность покрытия, определенная методом штифтовой пробы, была достигнута на дистанции напыления 90...100 мм и составила 80 МПа при толщине покрытия 0,5 мм. При этом содержание элементов в поверхностном слое равнялось, %: 0,4...0,43 С, 0,7...0,77 Мn, 0,17 Si, остальное — Fe.

Твердость покрытия составила *НВ* 220...240, а пористость напыленного слоя находилась в пределах 1...2 %.

Важным технологическим приемом является обработка каждого напыленного слоя поверхности стальной быстровращающейся щеткой, которая отделяет плохо прикрепившиеся к поверхности частицы. Их фракционный состав представлен на рис. 2, из которого следует, что основной составляющей (84 %) является мелкая и пылевидная фракции, препятствующие полноценному когезионному сцеплению частиц. В результате послойной механической обработки можно повысить когезионную прочность сцепления покрытия на 27 %.

Выводы

1. Увеличение сварочного тока и расхода аргона приводит к возрастанию напряжения на дуге.

2. Параметры режима плазменного напыления, рассмотренные в данной работе, не оказывают существенного влияния на фракционный состав напыляемых частиц, которые имеют преимущественно размер 0,1...0,315 мм.

3. Частицы размером менее 0,1 мм и пылевидные фракции имеют низкую когезионную способность, а их послойное удаление быстровращающейся стальной щеткой позволяет повысить когезионную прочность сцепления покрытия на 27 %.

1. Пат. 45253 Україна, 7 Н05Н1/100, 1/24, Н05В7/18 В23К10/00. Электродуговой плазмотрон / Г. М. Русев, С. М. Кисельов, В. В. Овсяніков, М. П. Галюк. — № 2001074789; заявл. 10.07.2001; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.
2. Технология восстановления и упрочнения наружных и внутренних поверхностей тел вращения и плоских поверхностей плазменным напылением / Г. М. Русев, В. В. Овсянников, С. М. Киселев, Н. Ф. Галюк // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. — С. 61–62.

Поступила в редакцию 06.09.2012



ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НЕПРОВАРАМИ В КОРНЕ ШВА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

С. А. СОЛОВЕЙ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты усталостных испытаний тавровых сварных соединений низколегированных сталей 09Г2С, 10ХСНД и 15ХСНД, при изготовлении которых закладывался конструктивный непровар корня шва поперечным сечением 3×3 мм по всей длине сварного соединения. Целью данных исследований являлась экспериментальная оценка влияния протяженных непроваров на циклическую долговечность упрочненных технологией высокочастотной механической проковки тавровых сварных соединений из низколегированных сталей, которые используются при изготовлении ответственных сварных металлоконструкций. Испытания сварных образцов проводили при отнулевом цикле нагружения с частотой 5 Гц. Показано, что циклическая долговечность высоконагруженных упрочненных данной технологией тавровых сварных соединений низколегированных сталей, содержащих протяженные конструктивные непровары корня шва поперечным сечением 3×3 мм, находится в пределах разброса экспериментальных данных упрочненных сварных соединений, выполненных с полным проплавлением. При этом разрушение образцов происходит от непровара корня шва по ребру, а их циклическая долговечность повышается до 10 раз по сравнению с циклической долговечностью неупрочненных образцов с полным проплавлением. Установлено, что наличие конструктивного непровара в неупрочненных высоконагруженных тавровых сварных соединениях, поперечные ребра которых не передают основной нагрузки, не оказывает влияния на циклическую долговечность, поскольку образование трещин и их развитие происходит по зоне перехода металла шва к основному металлу. Библиогр. 13, рис. 4.

Ключевые слова: сварные металлоконструкции, низколегированные стали, тавровое соединение, циклическая долговечность, высокочастотная механическая проковка, усталость

Значительная часть сварных металлоконструкций инженерного назначения (мосты, путепроводы, морские стационарные платформы) изготавливается из низколегированных сталей. Как правило, до 70 % сварных соединений в таких конструкциях составляют тавровые сварные соединения. Одним из наиболее вероятных дефектов при приварке элементов металлоконструкций угловыми швами является непровар корня шва. Известно, что непровары являются причиной появления значительных концентраций напряжений и вызывают резкое снижение предела выносливости сварных соединений, особенно стыковых [1–3]. В меньшей степени наличие непровара в корне шва сказывается на циклическую долговечность тавровых сварных соединений, поперечные ребра которых не передают основной нагрузки. При невысоких уровнях переменных нагрузок непровары в таких соединениях могут не проявлять себя на протяжении всего срока службы, а усталостное разрушение будет происходить в зоне перехода шва на основной металл.

В настоящее время актуальной является задача повышения несущей способности эксплуатируе-

мых сварных металлоконструкций с помощью различных ремонтно-восстановительных работ с применением упрочняющих послесварочных технологий. Для повышения сопротивления усталости сварных соединений все более широкое применение находит высокочастотная механическая проковка (ВМП), известная в литературе также как ультразвуковая ударная обработка [4–9]. Применение данного способа обработки сварных соединений хорошо изучено применительно к тавровым сварным соединениям с полным проплавлением как в исходном состоянии после сварки, так и после наработки определенного количества циклов перемен напряжений [8, 10–12]. Показано, что упрочнение технологией ВМП позволяет существенно повысить характеристики сопротивления усталости таких соединений, а соответственно и уровни прикладываемых к ним напряжений. В выполненных исследованиях отсутствуют данные о сопротивлении усталости упрочненных ВМП тавровых сварных соединений с технологически или конструктивными непроварами корня шва, в том числе при повышенных уровнях прикладываемых напряжений, отвечающих упрочненным сварным соединениям.

Целью данной работы являлась оценка влияния непроваров на циклическую долговечность тавровых сварных соединений низколегированных сталей, упрочненных технологией ВМП.

Испытания на усталость проводили на образцах тавровых сварных соединений низколегированных сталей 09Г2С ($\sigma_T = 375$ МПа, $\sigma_B = 510$ МПа), 10ХСНД ($\sigma_T = 420$ МПа, $\sigma_B = 610$ МПа) и 15ХСНД ($\sigma_T = 400$ МПа, $\sigma_B = 565$ МПа). Заготовки под образцы из этих сталей вырезали из листового проката так, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной дуговой сваркой электродами марки УОНИ-13/55. Непровар корня шва поперечным сечением 3×3 мм по всей ширине образца (длине сварного шва) формировали путем увеличения зазора между пластиной и привариваемым ребром, а также увеличением ширины кромки притупления. Форма и геометрические размеры образца с непроваром в корне шва приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину рабочей части образца выбирали исходя из мощности испытательного оборудования. Упрочнение сварных соединений проводили компактным ручным оборудованием US-TREAT-1.0. Образцы испытывали на усталость на машине УРС-20 при отнулевом переменном растяжении с частотой 5 Гц при регулярном и нерегулярном нагружении (рис. 2). Каждый образец испытывали до полного разрушения.

Для определения места зарождения трещины (по линии сплавления или от непровара) в образцах тавровых сварных соединений с непроваром корня шва при повышенных уровнях прикладываемых напряжений испытывали два образца из стали 10ХСНД. Зоны перехода шва на основной металл 1 и 2 (рис. 1) подвергали обработке ВМП в исходном состоянии после сварки. Испытания проводили при уровнях прикладываемых максимальных напряжений 290 МПа. После наработки 102,3 и 119 тыс. циклов перемен напряжений в неупрочненных зонах (соответственно зона 4 образца № 1 и зона 3 образца № 2) появились усталостные трещины глубиной до 0,5 мм (длиной до 3 мм). После обработки ВМП поврежденных усталостными трещинами зон испытания продолжили при тех же уровнях нагружения. В процессе дальнейших испытаний аналогичные трещины в неупрочненных зонах 3 образца № 1 и

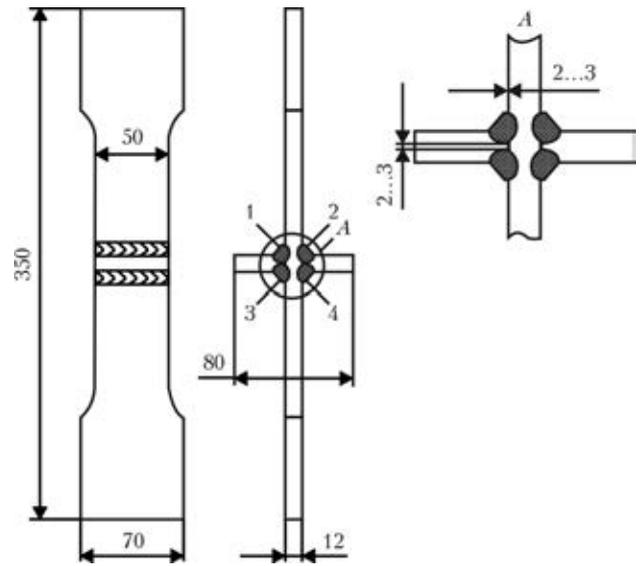


Рис. 1. Форма и размеры образцов тавровых соединений низколегированных сталей

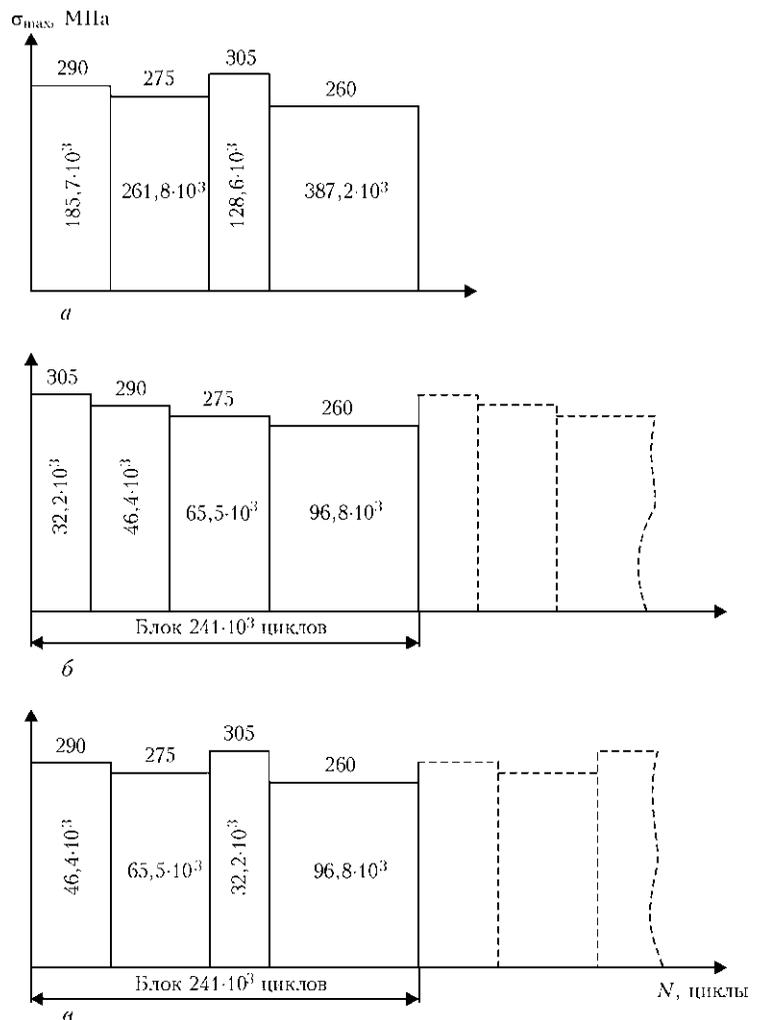


Рис. 2. Схема нагружения образцов таврового сварного соединения стали 09Г2С при многоступенчатом (а) и блочном нагружении с убывающей (б) и квазислучайной (в) последовательностями приложения нагрузок



4 образца № 2 появились после наработки 232,5 и 152,8 тыс. циклов перемен напряжений соответственно. После обработки ВМП поврежденных усталостными трещинами зон испытания продолжились. Разрушения образца № 1 произошло после 858,9 тыс. циклов, а образца № 2 — после 1832,4 тыс. циклов перемен напряжений. В обоих случаях усталостные трещины развивались от непроваров, разрушение произошло по приваренным ребрам, которые не передают основного усилия. Разрушенные образцы представлены на рис. 3, рис. 4.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о том, что непровар в неупрочненных тавровых сварных соединениях, поперечные ребра которых не передают основной нагрузки, может не проявить себя на протяжении всего срока службы, поскольку разрушение будет происходить по зоне перехода шва к основному металлу. Исходя из кривой усталости упрочненных ВМП тавровых сварных соединений, выполненных с полным проплавлением [10], их долговечность при уровнях прикладываемых максимальных напряжений 290 МПа находится в диапазоне 600...1100 тыс.

циклов, при этом разрушение происходит по зоне перехода шва к основному металлу. Таким образом, после упрочнения технологией ВМП циклическая долговечность сварных соединений повышается в 5...10 раз по сравнению с циклической долговечностью неупрочненных образцов с полным проплавлением [10], а разрушение происходит от непроваров по ребру. Проведенные исследования также подтверждают высокую эффективность упрочнения технологией ВМП сварных соединений с усталостными трещинами незначительной глубины ($\approx 0,5$ мм).

На образцах № 3, 4 тавровых сварных соединений с непроварами соответственно из сталей 09Г2С и 15ХСНД, упрочненных технологией ВМП, проводили оценку влияния уровня прикладываемых напряжений на место зарождения трещины (по линии сплавления или от непровара). Упрочнение технологией ВМП всех зон сварного соединения проводили в исходном состоянии после сварки. Образец из стали 09Г2С испытывали при уровне прикладываемых максимальных напряжений 260 МПа. Разрушение от непровара по ребру произошло после 1127,2 тыс. циклов перемен напряжений (рис. 4, в). Сварные образцы с полным проплавлением, упрочненные технологией ВМП в исходном состоянии, при нагружении максимальными напряжениями цикла 260 МПа при аналогичных испытаниях разрушались в диапазоне 1150...1950 тыс. циклов перемен напряжений по линии сплавления [11]. Образец из стали 15ХСНД испытывали при уровне прикладываемых максимальных напряжений 300 МПа. Разрушение от непровара по ребру произошло после 830,7 тыс. циклов перемен напряжений (рис. 4, з). Упрочненные технологией ВМП сварные образцы с полным проплавлением при нагружении максимальными напряжениями 300 МПа при аналогичных испытаниях разрушались в диапазоне 600...900 тыс. циклов перемен напряжений по линии сплавления. Таким образом, в диапазоне прикладываемых максимальных напряжений 260...300 МПа, характерных для многоциклового участка упрочненных тавровых сварных соединений из низколегированных сталей, разрушение исследуемых образцов происходит от непровара по ребру. При этом циклическая долговечность сварных соединений повышается до 10 раз по сравнению с циклической долговечностью неупрочненных образцов с полным проплавлением [11].

Известно, что металлоконструкции инженерного назначения в процессе эксплуатации, как правило, подвергаются сложным нерегулярным режимам нагружения [13]. Для оценки влияния вида нагружения (многоступенчатое или блочное) на эффективность упрочнения технологией ВМП изготовили четыре образца тавровых сварных соединений стали 09Г2С с непроваром. Схемы на-

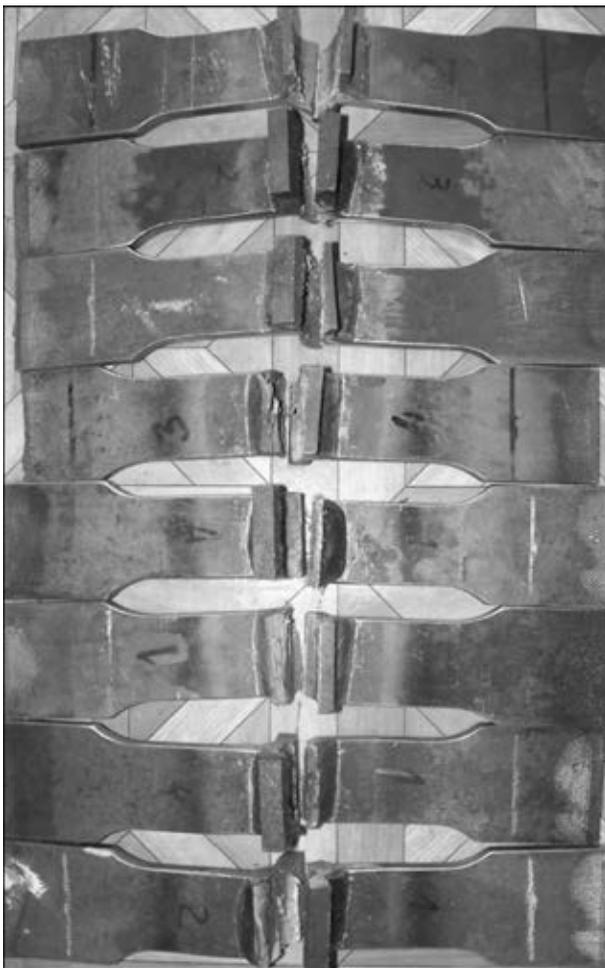


Рис. 3. Общий вид упрочненных технологией ВМП образцов таврового сварного соединения с непроварами в корне шва после испытаний на усталость

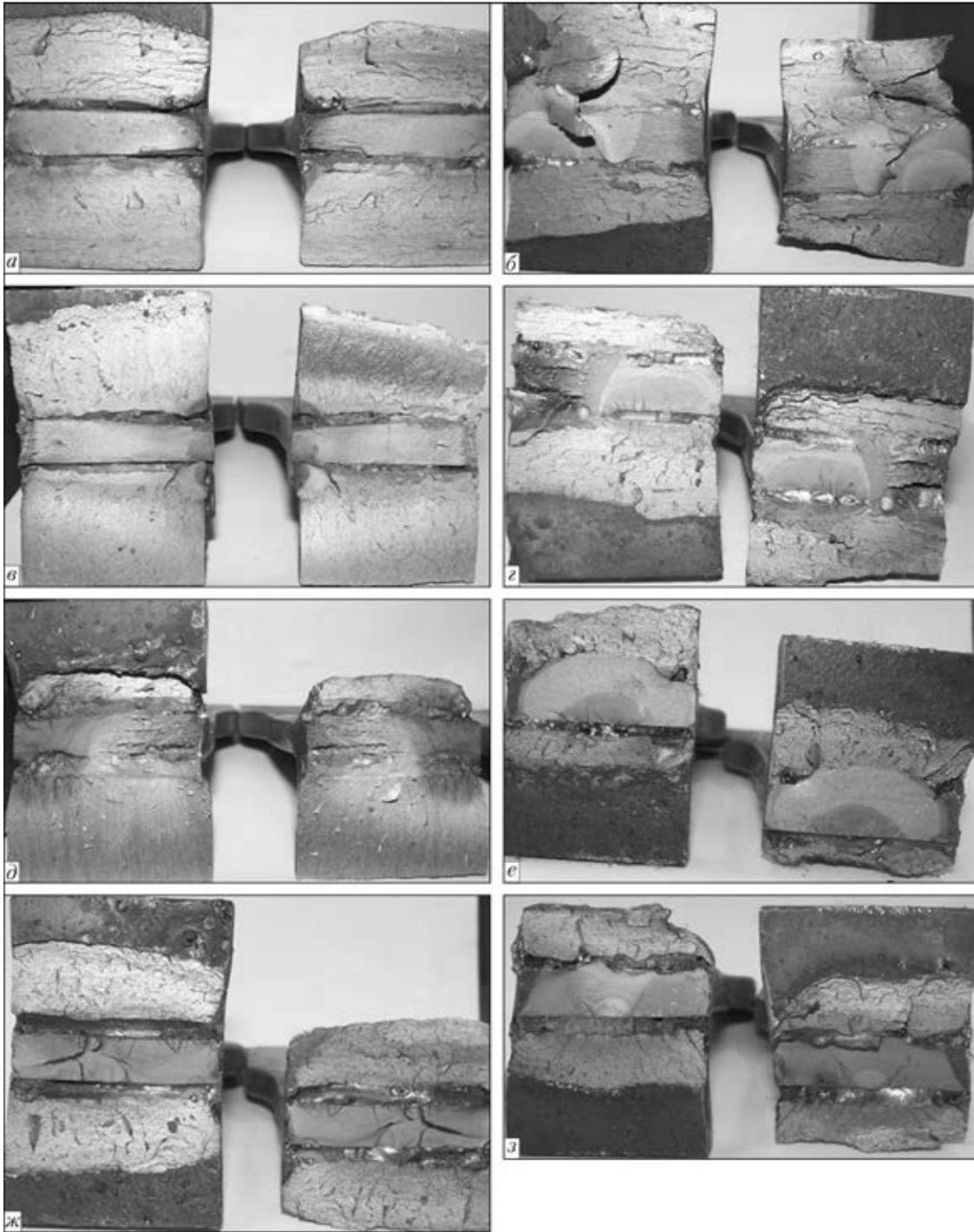


Рис. 4. Усталостные изломы тавровых сварных соединений с непроварами в корне шва: а–з — соответственно образцы № 1–8

ружения образцов с указанием уровней прикладываемых максимальных напряжений, их последовательности и количества циклов на каждом уровне приведены на рис. 2. Все образцы упрочняли технологией ВМП в исходном состоянии после сварки. Аналогичные испытания образцов тавровых сварных соединений с полным проплавлением, упрочненных технологией ВМП, при данных схемах нагружения проводили ранее, а их результаты представлены в работах [11, 12].

Образец № 5, который испытывали в условиях многоступенчатого нагружения (см. рис. 2, а), раз-

рушился после наработки 119,4 тыс. циклов на третьем уровне нагружения (рис. 4, д). Общая наработка на трех уровнях нагружения составила 566,9 тыс. циклов. Упрочненные технологией ВМП сварные образцы с полным проплавлением при аналогичных испытаниях разрушались в диапазоне 565,8...1079,8 тыс. циклов перемен напряжений по линии сплавления [11].

Образцы № 6 и 7 испытывали в условиях блочного нагружения с убывающим порядком приложения нагрузок в каждом блоке (см. рис. 2, б). Разрушение образцов произошло соответственно



после 26,3 тыс. циклов на второй ступени четвертого блока нагружения (суммарное количество циклов до разрушения на всех уровнях нагружения 781,2 тыс. циклов) и после 76,8 тыс. циклов на четвертой ступени второго блока нагружения (суммарное количество циклов до разрушения на всех уровнях нагружения — 461,8 тыс. циклов). Фотографии усталостных изломов приведены на рис. 4, *е, ж* соответственно. Упрочненные сварные образцы с полным проплавлением при аналогичных испытаниях разрушались в диапазоне 492,3...775,6 тыс. циклов перемен напряжений по линии сплавления [12]. Как видно из рис. 4, *ж*, высокая долговечность образца с непроваром обусловлена развитием трещины в ребре и выполнением приварки одного ребра фактически с полным проплавлением.

Образец № 8 испытывали в условиях блочного нагружения с квазислучайным порядком приложения нагрузок в каждом блоке (см. рис. 2, *в*). Разрушение образца произошло после 54,4 тыс. циклов на второй ступени третьего блока нагружения (суммарное количество циклов до разрушения на всех уровнях нагружения — 58,26 тыс. циклов). Упрочненные технологией ВМП сварные образцы с полным проплавлением при аналогичных испытаниях разрушались в диапазоне 578,2...737,8 тыс. циклов перемен напряжений по линии сплавления [12].

Визуальный анализ усталостных изломов тавровых сварных соединений (см. рис. 4) показал, что при изготовлении образцов удалось заложить непровары по всей их ширине (длине сварного шва) с двух сторон непосредственно под приваренными ребрами, за исключением образца № 7. Выдержано также постоянство геометрических размеров непроваров во всех образцах в пределах 2...3 мм (как по высоте, так и по ширине) практически по всей длине сварного шва.

Полученные результаты показывают, что долговечность упрочненных технологией ВМП тавровых сварных соединений с протяженными непроварами (поперечное сечение 3×3 мм) находится в пределах разброса экспериментальных данных образцов с полным проплавлением. Это можно объяснить следующим образом.

Результаты фрактографического анализа усталостных изломов испытанных образцов показывают, что развитие трещины в образцах с непроварами происходит как в основном металле, так и в металле ребра (см. рис. 4), а в образцах с полным проплавлением — только в основном металле по линии сплавления. Несмотря на то что зарождение усталостной трещины от непровара может происходить раньше, чем в зоне перехода шва на основной металл, ее развитие проходит при меньших напряжениях от внешней нагрузки, вследствие большего поперечного сечения плос-

кости ее развития (учитывая высоту приваренных ребер). При этом одна из ее вершин развивается в слабонагруженном ребре. Поэтому разрушение в зоне непровара проходит менее интенсивно, практически не снижая долговечность соединений в сравнении с долговечностью бездефектных соединений до полного разрушения. В сварных соединениях с непроварами значительная доля от установленной циклической долговечности приходится на рост усталостной трещины в основном металле и в металле приваренного ребра (см. рис. 4). Так, в сварных соединениях с полным проплавлением, упрочненных технологией ВМП, критическая глубина трещины в зоне перехода шва на основной металл находится в пределах 4...8 мм, а в упрочненных сварных соединениях с непроваром в момент хрупкого долома глубина усталостной трещины достигает 12...20 мм.

Такая особенность кинетики усталостного разрушения упрочненных ВМП тавровых сварных соединений с непроварами, поперечные ребра которых не передают основной нагрузки, позволяет с помощью ВМП существенно повышать их циклическую долговечность. При этом показатели сопротивления усталости упрочненных технологией ВМП сварных соединений с непроварами находятся на уровне показателей упрочненных сварных соединений, выполненных с полным проплавлением.

Выводы

1. Установлено, что наличие протяженного (по всей ширине образца) непровара корня шва поперечным сечением 3×3 мм в неупрочненных высоконагруженных тавровых сварных соединениях, поперечные ребра которых не передают основной нагрузки, не оказывает влияния на циклическую долговечность, поскольку образование трещин и их развитие происходит по зоне перехода металла шва к основному металлу.

2. Показано, что циклическая долговечность высоконагруженных упрочненных технологией ВМП тавровых сварных соединений низколегированных сталей, содержащих конструктивные или технологические протяженные непровары корня шва поперечным сечением 3×3 мм, находится в пределах разброса экспериментальных данных упрочненных сварных соединений, выполненных с полным проплавлением. При этом циклическая долговечность упрочненных сварных соединений с непроварами повышается до 10 раз по сравнению с циклической долговечностью неупрочненных образцов с полным проплавлением.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
2. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках: В 2-х т. / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.

3. *Несущая способность сварных соединений с технологическими дефектами* / В. И. Труфяков, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, А. В. Бабаев: Учеб. пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по технологии и оборудованию сварочного производства. — М.: Машиностроение, 1988. — 48 с.
4. *Xiaohui Zhao, Dongpo Wang, Lixing Huo. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment* // Materials & Design. — 2011. — 32, № 1. — P. 88–96.
5. *Abston S. The technology and applications of ultrasonic impact technology* // Australas. Welding J. — 2010. — 55. — P. 20–21.
6. *The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints* / Danqing Yin, Dongpo Wang, Hongyang Jing, Lixing Huo // Materials & Design. — 2010. — 31, № 7. — P. 3299–3307.
7. *Gary Marquis. Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds* // Eng. Fract. Mech. — 2010. — 77. — P. 2051–2062.
8. *Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening* / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy et al. // Welding in the World. — 2007. — 51, № 7/8. — P. 47–53.
9. *Verloengering der lebensdauer von schweißkonstruktion aus hoehere festen baustaehlen durch Anwendung der UIT-technologie* / U. Kuhlmann, A. Durr, P. Gunther et al. // Schweißen und Schneiden. — 2005. — 57, № 8. — S. 384–391.
10. *Сопrotивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой* / В. В. Кныш, И. И. Вальтерис, А. З. Кузьменко, С. А. Соловей // Автомат. сварка. — 2008. — № 4. — С. 5–8.
11. *Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Накопление усталостных повреждений в тавровых сварных соединениях стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной механической проковкой состояниях* // Там же. — 2008. — № 10. — С. 12–18.
12. *Кныш В. В., Кузьменко О. З., Соловей С. О. Накопичення втомних пошкоджень в таврових зварних з'єднаннях в початковому і зміцненому високочастотним проковуванням станах при блоковому навантаженні* // Машинознавство. — 2009. — № 9. — С. 27–31.
13. *Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопrotивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч. 1.* — Киев: Наук. думка, 1987. — 521 с.

Поступила в редакцию 14.11.2012

Международная конференция «Алюминий-21/СВАРКА И ПАЙКА»

Вторая международная конференция и выставка «Алюминий-21/СВАРКА И ПАЙКА» состоялась с 20 по 22 ноября 2012 г. в гостинице «Sokos Palace Bridge», г. Санкт-Петербург.

Проведение конференции официально поддержали: Международный сварочный институт (Франция), Российское научно-техническое сварочное общество (Россия), Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ЦНИИ КМ «Прометей» (Россия) и Ассоциация прессовщиков алюминия АПРАЛ (Россия).

Пленарную сессию конференции открыл доклад президента РНТСО, д-ра техн. наук, профессора Олега Стеклова. Он рассказал о проблемах и тенденциях развития сварочного производства в России.

На конференции обсуждались успехи последних лет и современные проблемы получения сварных и паяных соединений в конструкциях из алюминиевых сплавов и легких металлов.

В работе конференции приняли участие 78 представителей 53 компаний из 9 стран мира, включая Австрию, Германию, Китай, Нидерланды, Россию, США, Украину, Финляндию, Швецию.

В ходе пленарного и сессионных заседаний было заслушано 33 доклада. По итогам опроса участников наиболее интересными докладами были признаны следующие:

- современное развитие сварки трением с перемешиванием в Китае — Guohong Luan, BAMTRI (Китай);
- сварка трением с перемешиванием в производстве крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов — Петр Васильев, Чебоксарское предприятие «Сеспель» (Россия);
- технологии роботизированной сварки алюминиевых деталей скоростных поездов с большими допусками — Martin Wihsbeck, igm Robotersysteme AG (Австрия);
- лазерно-лучевая сварка высокопрочных алюминиевых сплавов — Jens Standfuss, Fraunhofer IWS Dresden (Германия);
- высококачественные сварочные проволоки для MIG и TIG сварки алюминиевых сплавов производства ЭСАБ-Алкотек — Сергей Чамов, ЭСАБ (Швеция);
- современные способы сварки алюминия плавлением — Israel Stol, Alcoa (США);
- свойства и структура сварных соединений из нового свариваемого сплава 15654 системы Al-Mg — А. Дриц, Алкоа-Россия (Россия).

На пути к новому поколению коррозионно-стойких алюминиевых листов для пайки — Farid Norouzi Afshar, Tu Delft (Нидерланды).

Официальный партнер конференции компания «Алкоа-Россия» учредила специальный приз за инновационные технологии и наиболее значимые достижения, представленные в докладах и на экспозиции.

На выставке материалов, технологий и оборудования свою продукцию и услуги представили такие ведущие компании, как ООО «ВКС», ООО «Технологический центр ТЕНА», ООО «Опытный завод «Авиаль» (Россия), ESAB и Sara Heat Transfer AB (Швеция).

22 ноября состоялись эксклюзивные экскурсии на кафедру сварки факультета «Технологии и исследования материалов» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и производственную площадку компании «Алюарт».

Участники конференции были проинформированы о том, что 8-й Международный конгресс «Алюминий две тысячи» состоится в Милане, Италия, 14–18 мая 2013. <http://www.aluminium2000.com/>.

Пресс-релиз



ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Ю. В. Фальченко (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 19 декабря 2012 г. докторскую диссертацию на тему «Исследование влияния структуры промежуточных прослоек на свойства сварных соединений труднодеформируемых материалов и разработка на этой основе технологии их диффузионной сварки».

Диссертация посвящена изучению закономерностей формирования структуры и механических свойств сварных соединений при диффузионной сварке в вакууме композиционных материалов на алюминиевой основе, интерметаллидных сплавов γ -TiAl и разнородных металлов с применением в качестве промежуточных слоев вакуумных конденсатов.

Изучено влияние толщины прослоек из алюминия на формирование структуры и механические свойства сварных соединений из композиционных материалов Al + 4 % C, AMg5 + 23 % SiC, AMg5 + 27 % Al₂O₃. Показано, что сварка композиционных материалов в свободном состоянии не обеспечивает формирование бездефектных соединений. Применение схемы сварки с принудительным деформированием позволяет локализовать пластическую деформацию в стыке при увеличении степени пластической деформации прослойки из алюминия с 13 до 33 %, что также способствует увеличению содержания магния в зоне соединения с 3...3,8 до 4...4,5%. Микротвердость зоны соединения составляет 600...700 МПа.

Однако химическая и структурная неоднородности зоны соединения, вызванная применением мягких промежуточных прослоек, обуславливают прочностные свойства соединений на уровне 50...60 % уровня прочности основного материала. Повышение скорости пластической деформации до $\epsilon = 10^2 \text{ с}^{-1}$ при применении ударной сварки в вакууме способствует увеличению степени деформации прослойки до 70...80 %, однако повышает неоднородность в распределении химических элементов в стыке.

Применение при сварке композиционного материала многослойных фольг системы Al-Cu обуславливает дисперсное упрочнение стыка частицами интерметаллида CuAl₂. Установлено, что

применение более тонких фольг с периодом чередования слоев от 40 до 100 нм (при содержании 10 мас. % Cu) приводит к формированию в стыке диффузионной зоны толщиной 7... 10 мкм, обедненной по содержанию меди. Применение прослоек Al — 26,8 мас. % Cu общей толщиной 20 мкм с периодом чередования слоев меди и алюминия 2000 нм способствует формированию в стыке структуры с дисперсными включениями CuAl₂ размером 3...10 мкм. Определено, что формирование такой структуры в стыке обеспечивает получение сварных соединений с прочностью на растяжение на уровне 325 МПа, что составляет 96 % уровня прочности исходного материала.

Установлено, что применение при диффузионной сварке интерметаллидного сплава γ -TiAl многослойных фольг Al/Ti сопровождается протеканием в стыке реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, которая приводит к увеличению исходного размера фольги вследствие образования волнообразного рельефа и пористой структуры. Последующая выдержка при температуре сварки под давлением обеспечивает залечивание пор и формирование в стыке бездефектной мелкозернистой структуры с микротвердостью HV 3500...4200 МПа, соответствующей микротвердости основного материала. Определены оптимальные параметры режима сварки: температура $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, давление $P = 10...40 \text{ МПа}$, время $t = 20 \text{ мин}$, толщина многослойной фольги $\delta = 20 \text{ мкм}$, которые обеспечивают получение сварных соединений с прочностью на срез на уровне 290 МПа, что соответствует 91 % уровня прочности исходного материала. Проведение дополнительного отжига при 1200 °C в течение 2 ч позволяет увеличить прочность до 314 МПа (98 %).

Применение при диффузионной сварке интерметаллидного сплава γ -TiAl со сплавом титана BT8 или сталью 12X18H10T многослойных фольг системы Al-Ti обеспечивает получение в зоне соединения равномерного распределения химического состава элементов и микротвердости.

Показано, что применение пористых конденсатов из никеля при диффузионной сварке хрома с медью способствует снижению температуры и давления процесса сварки.

Сформулированы рекомендации по практическому применению вакуумных конденсатов при диффузионной сварке в вакууме труднодеформируемых материалов.



НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

Б. А. МОВЧАНУ — 85



Исполнилось 85 лет известному ученому в области материаловедения и электронно-лучевой технологии академику НАН Украины Борису Алексеевичу Мовчану.

Борис Алексеевич Мовчан родился 9 января 1928 г. в селе Макиевка Носовского района (ранее Лосиновский район) Черниговской области. В 1944 г. окончил Макиевскую неполную среднюю школу, в 1946 г. — два курса Киевского судостроительного техникума, а в 1951 г. — физический факультет Киевского государственного университета им. Т. Г. Шевченко по специальности «Металлофизика».

С 1951 г. и по настоящее время Б. А. Мовчан работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины: сначала научным сотрудником института, с 1960 по 1994 гг. — заведующим отделом электронно-лучевых технологий, а с 1994 г. возглавил основанный им «Международный центр электронно-лучевых технологий ИЭС им. Е. О. Патона» (МЦ ЭЛТ). Начиная с 2003 г. и по настоящее время Б. А. Мовчан работает главным научным сотрудником отдела парофазных технологий неорганических материалов Института электросварки им. Е. О. Патона и научным сотрудником-консультантом МЦ ЭЛТ.

В 1954 г. Б. А. Мовчан защитил диссертацию на присвоение ученой степени кандидата технических наук, в 1961 г. стал доктором технических наук. В июне 1964 г. его избрали членом-корреспондентом Академии наук УССР, а в марте 1978 г. —

академиком Академии наук УССР по специальности «Материаловедение и прочность материалов».

Б. А. Мовчан по праву считается основателем научной школы получения новых материалов и многофункциональных покрытий способом электронно-лучевой технологии испарения и конденсации в вакууме. На протяжении многих лет основным направлением его научной деятельности является изучение структуры и свойств конденсированных неорганических материалов.

Технология электронно-лучевого испарения (атомизации) и последующего физического осаждения паровой фазы в вакууме для получения материалов и покрытий с заданными структурой и свойствами начала разрабатываться в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством Б. А. Мовчана в начале 60-х годов прошлого столетия. Созданные в период 1975–1991 гг. электронно-лучевые технологии и оборудование для нанесения защитных покрытий на лопатки газовых турбин были внедрены на многих предприятиях министерств авиационной, судостроительной и газовой промышленности СССР.

Под его руководством в МЦ ЭЛТ разработана и запатентована одностадийная технология с использованием композиционного слитка для нанесения градиентных защитных покрытий, продолжают систематические научные исследования и разработки новых материалов и защитных покрытий, включая аморфные, нанокристаллические, дисперсноупрочненные, микрослойные, пористые и градиентные. Ведутся разработки вариантов гибридных электронно-лучевых технологий, объединяющих физические и химические процессы осаждения неорганических веществ в вакууме. Конкретные технологии и новые образцы электронно-лучевого оборудования, получившие международное признание, защищены многочисленными патентами (США, Европы, России, КНР), в том числе совместными патентами с заказчиками.

Б. А. Мовчан опубликовал более 370 научных работ, семь монографий, получил более 100 патентов. Им подготовлено 56 кандидатов и шесть докторов наук, в настоящее время он руководит несколькими молодыми аспирантами. Он является членом редколлегии ряда научных журналов и научных советов.

Научная деятельность Б. А. Мовчана отмечена рядом государственных наград. В 1974 г. ему присуждена Государственная премия УССР в области науки и техники, в 1976 г. — орден Трудового Красного Знамени, в 1981 г. — второй орден Тру-



дового Красного Знамени, в 1984 г. — Ленинская премия за работу в области электронно-лучевой технологии, в 1988 г. — орден Ленина, 1989 г. — Премия Е. О. Патона НАН Украины, в 1998 г. — орден «За заслуги» III степени. В 2004 г. Борису Алексеевичу присуждено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины». Работа Б. А. Мовчана отмечена также почетными дипломами Американского вакуумного общества (1983,

1988) и Почетным дипломом Министерства авиационной промышленности Китая (1988).

Свое 85-летие академик НАН Украины Б. А. Мовчан встречает полным творческих сил, развивая новое инновационное направление: электронно-лучевую технологию простых и композиционных нанопорошков и наножидкостей (коллоидов) для медицины, экологии и сельского хозяйства.

Д. М. КАЛЕКО — 80



В январе 2013 г. ведущему научному сотруднику отдела сварочных материалов и родственных технологий в медицине и экологии лауреату Государственной премии УССР в области науки и техники Давиду Михайловичу Калеко исполнилось 80 лет.

В 1955 г. Давид Михайлович закончил Киевский политехнический институт по специальности «Технология и оборудование сварочного производства». Работал на Николаевском судостроительном заводе «Океан», затем перешел в ИЭС им. Е. О. Патона. С 1959 г. основным направлением его деятельности в институте стала конденсаторная сварка. Глубокие исследования физических процессов при разрядах конденсаторов послужили научной основой для создания оборудования и технологии микросварки многих металлов дугой, горящей от разряда конденсаторов. Эта работа нашла применение при изготовлении деталей электротехнического оборудования, электронных приборов, изделий для вычислительной техники, систем управления и др. В то же время разработанная им техника нашла применение для термообработки поверхности деталей.

Значительный объем исследований, выполненных при участии Д. М. Калеко, посвящен решению

проблем, возникших в ракетно-, авиа-, судостроении и других отраслях техники, где для ответственных изделий потребовалось крепление обшивки, соединение узлов из разнородных материалов и т. п. С этой целью разработаны способы приварки шпилек из различных металлов, в том числе ударно-конденсаторный и дугоконтактный алюминиевых шпилек для аэрокосмической техники и стальных под водой для деталей трубчатой формы. Им разработана техника торцевой сварки стержней арматурной стали. За эту работу в 1991 г. творческий коллектив, в состав которого входил Д. М. Калеко, был отмечен Государственной премией УССР в области науки и техники.

Последнее десятилетие Д. М. Калеко работает над медицинскими проблемами. Им под руководством Б. Е. Патона созданы на основе титана и никеля сплавы с эффектом памяти формы, удовлетворяющие требованиям биоинертности и биосовместимости, которые, будучи деформированными при низких температурах, восстанавливают форму при температуре человеческого тела. Созданы имплантаты и инструменты из новых сплавов, в том числе стенты с регулируемыми размерами и формой, используемые в качестве протезов; экстракторы для удаления камней из трубчатых органов человека и обломков костей при переломах.

На счету Д. М. Калеко около двухсот публикаций и изобретений, три монографии.

П. А. КОСЕНКО — 70



Директору ГП «Опытный завод сварочных материалов» ИЭС им. Е. О. Патона, заслуженному машиностроителю Украины, дважды лауреату Премии Совета Министров СССР Петру Алексеевичу Косенко исполнилось 70 лет. Юбилейная дата имениника совпала с другим юби-

леем — 35-летием его руководства заводом.

Трудовая деятельность Петра Алексеевича связана с Киевским сеточно-электродным заводом, куда он в 1969 г. пришел после окончания Киевского политехнического института. В период 1972–1977 гг. он был главным инженером завода, а в 1977 г., когда это предприятие было репрофилировано в ГП «Опытный завод сварочных материалов» ИЭС им. Е. О. Патона, был назначен его директором.

Глубокие знания, большой организаторский талант — все было направлено на развитие завода и



реализовалось в модернизации производства сварочных материалов. В содружестве со специалистами института на заводе были созданы новые производственные мощности по изготовлению порошковой проволоки, керамических флюсов и других материалов для сварки, наплавки и пайки; освоено изготовление 32 марок сварочных электродов, 40 марок порошковой проволоки, 25 марок плавящихся и керамических флюсов. Сегодня в цехах завода успешно эксплуатируется технологическое оборудование, разработанное и изготовленное на предприятии.

Благодаря внедрению нового и постоянной модернизации действующего технологического оборудования по производству всех видов сварочных материалов, а также высокой квалификации рабочих, инженерно-технического персонала, умелому руководству П. А. Косенко ОЗСМ сохранил высокий уровень производства в период становления рыночной экономики в СССР и в период независимой Украины. Завод продолжал осваивать новейшие разработки научных отделов ИЭС им. Е. О. Патона, сохраняя ведущую роль в выполнении заказов предприятий машиностроения, промышленного строительства. Вся продукция, выпускаемая ГП «ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона», в том числе элект-

роды для ручной сварки, порошковая проволока, плавящиеся и керамические флюсы, сертифицирована. Ряд марок электродов имеет разрешение Российского Морского Регистра.

В настоящее время П. А. Косенко руководит научно-технической, производственной и хозяйственной деятельностью завода, определяет направления развития производства, обеспечивает ритмичную работу и выполнение планов технических разработок, изготовление образцов, выпуск опытных и промышленных партий продукции. Эти разработки благодаря своему высокому техническому уровню нашли применение в тяжелом и транспортном машиностроении, энергетике, мостостроении, строительстве трубопроводов и других отраслях промышленности. Под руководством П. А. Косенко завод стал одним из ведущих в СНГ предприятий по производству сварочных материалов.

Деятельность Петра Алексеевича отмечена правительственными наградами. Он награжден орденами «Знак Почета» и «За заслуги» II и III степени. В 2001 г. за развитие наукоемких технологий и производство сварочных материалов он удостоен почетного звания «Заслуженный машиностроитель Украины».

П. П. ПРОЦЕНКО — 60



В январе исполнилось 60 лет Петру Прокофьевичу Проценко — кандидату технических наук, директору Межотраслевого учебно-аттестационного центра ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Окончив с отличием Киевский политехнический институт и получив квалификацию инженера-механика по специальности «Оборудование и технология сварочного производства», защитил кандидатскую диссертацию, получил квалификацию международного инженера-сварщика.

П. П. Проценко является ведущим специалистом в сфере профессиональной подготовки, переподготовки, повышения квалификации, аттестации и сертификации персонала сварочного производства.

Он прошел путь от мастера производственной учебы Межреспубликанских курсов инструкторов по сварке до директора Межотраслевого учебно-аттестационного центра Института электросварки им. Е. О. Патона. При его участии подготовлено больше 30 тысяч специалистов-сварщиков для разных отраслей экономики.

П. П. Проценко приложил много усилий для формирования в Украине современной системы профессиональной подготовки сварщиков на уровне международных требований. Он является автором модульных технологий профессиональной подготовки сварщиков, разработанных в соответствии с требованиями Международной организации труда, которые и внедрены в Украине. Под его руководством в рамках украинско-немецкого проекта «Поддержка реформ профессионально-технического образования в Украине» разработаны принципиально новые подходы к определению широкопрофильных профессий в области сварки. Разработаны и утверждены Межотраслевая квалификационная характеристика и Государственный стандарт профессионально-технического образования на интегрированную профессию «Сварщик».

В 1994 г. по инициативе и при непосредственном участии П. П. Проценко был создан Украинский аттестационный комитет сварщиков как главный координационный центр по аттестации персонала сварочного производства в соответствии с национальными и международными требованиями. Сегодня этот комитет объединяет свыше 250 аттестационных центров разного ведомственного подчинения во всех регионах Украины.



П. П. Проценко входит в авторский коллектив по гармонизации международных и европейских стандартов в области сварки. С его участием разработаны и внедрены в качестве национальных международные стандарты (серии ДСТУ ISO 9606, ДСТУ EN 287, ДСТУ ISO 14731), которые регламентируют требования к уровню квалификации сварщиков и координаторов (руководителей) сварочных работ.

П. П. Проценко одним из первых среди украинских специалистов-сварщиков подтвердил свою международную квалификацию, получив в 1998 г. диплом Европейского (международного) инженера по сварке (IWE). Он представляет Украину в рабочих группах по профессиональной подготовке и

квалификации персонала в области сварки Европейской сварочной федерации и Международного института сварки.

В 2001 г. возглавляемый П. П. Проценко Межотраслевой учебно-аттестационный центр ИЭС им. Е. О. Патона получил аккредитацию от Международного института сварки на подготовку персонала с присвоением международных квалификаций в области сварки (международный инженер, международный технолог, международный специалист, международный инспектор, международный сварщик), которая способствует повышению конкурентоспособности украинских предприятий на международном рынке.

*Сердечно поздравляем юбиляров,
от всей души желаем им крепкого здоровья и бодрости,
творческой энергии и новых достижений в развитии
сварочной науки и сварочного производства!*

ПАМЯТИ В. И. МАХНЕНКО



2 января 2013 г. на 82-м году ушел из жизни доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины Владимир Иванович Махненко.

Родился В. И. Махненко в г. Черкассы. После окончания Одесского института инженеров морского флота в 1955 г. он начал трудовую деятельность на судоремонтном заводе в Архангельске. Работал мастером, потом — старшим технологом корпусно-сварочного цеха завода «Красная Кузница».

В 1959 г. поступил в аспирантуру Одесского института инженеров морского флота и успешно защитил в 1963 г. кандидатскую диссертацию. В 1964 г. был приглашен на работу в ИЭС им. Е. О. Патона, где непосредственно с его участием и по инициативе Б. Е. Патона был создан отдел математических методов исследования физико-химических процессов при сварке и спецэлектрометаллургии, который он возглавлял до последних дней жизни. Задачей отдела было широкое использование вычислительной техники и численных методов, активно развивающихся во всем мире, для эффективной обработки и анализа результатов сложных экспериментальных исследований явлений, возникающих при сварке, а также их математическое описание с целью получения оптимальных технологических и конструктивных параметров.

В 1973 г. он защитил докторскую диссертацию, в 1978 г. был избран членом-корреспондентом, в 1990 г. — академиком АН УССР. Жизненный путь В. И. Махненко тесно связан со сварочной наукой. Это годы плодотворных фундаментальных исследований, когда в полной мере проявились его неиссякаемое трудолюбие, целеустремленность, чувство нового, научная интуиция. В. И. Махненко вместе с учениками создана хорошо известная в стране и за рубежом школа по математическому моделированию тепловых, диффузионных, деформационных,

электромагнитных и других физических явлений в сварке и родственных технологиях.

Всемирное признание получили работы В. И. Махненко по прогнозированию комплекса физических параметров при сварке современных конструкционных материалов, которые определяют качество сварного соединения и работоспособность сварной конструкции: размеры, форма, химический состав и структура зоны проплавления, термические циклы, микроструктура и свойства металла зоны термического влияния, кинетика напряжений, деформаций и перемещений в процессе сварочного нагрева, риск возникновения горячих и холодных трещин, распределение остаточных напряжений и их влияние на предельное состояние сварных узлов при статических или переменных внешних нагрузках. На основе этих теоретических работ совместно с различными отраслевыми НИИ и промышленными предприятиями разработаны оптимальные варианты конструктивных и технологических решений для ряда новых сварных конструкций.

В последние годы В. И. Махненко активно работал над актуальной проблемой оценки работоспособности и ресурса безопасной эксплуатации сварных конструкций и сооружений, в том числе объектов энергетики Украины и магистральных трубопроводов. Разработанные под его руководством методы оценки допустимости выявленных дефектов в рамках идеологии «прогнозирования и предупреждения» в целом ряде случаев дали возможность отказаться от преждевременных ремонтов сварных конструкций ответственного назначения. В частности, им обоснована возможность ремонта сварочными технологиями магистральных трубопроводов без выведения их из эксплуатации. Итогом плодотворных разработок в этом направлении является монография «Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций», опубликованная в 2006 г., а также Государственная премия Украины по науке и технике за 2008 г.

Под руководством В. И. Махненко в течение многих лет проводились международные конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых принимали участие специалисты из разных стран мира.

В. И. Махненко является автором более 370 печатных работ, 112 из которых опубликованы в журнале «Автоматическая сварка», 12 монографий. Многие его работы опубликованы в США, Англии и ФРГ. Владимир Иванович щедро делился своими знаниями с молодежью и постоянно уделял внимание подготовке научных кадров. С момента обра-



зования в 1988 г. кафедры физической металлургии и материаловедения Московского физико-технического института профессор В. И. Махненко читал студентам курс лекций «Прочность сварных конструкций и соединений». Под его руководством подготовлены 5 докторов и 24 кандидата технических наук.

Плодотворную научную работу В. И. Махненко успешно совмещал с научно-организационной и общественной деятельностью, являясь руководителем секции Научно-координационного совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин НАН Украины, членом двух специализированных советов, членом редколлегии журнала «Автоматическая сварка».

В. И. Махненко награжден орденами Дружбы народов, «За заслуги» III и II степеней, а также медалями. Международное признание заслуг В. И. Махненко в сварочной науке нашло отражение в избрании его членом Американского общества

сварщиков (AWS) и членом Международной федерации количественных неразрушающих методов определения (QNDE). За значительный вклад в развитие отечественной науки и техники в направлении создания современных сварных конструкций и обеспечения ресурса их эксплуатации В. И. Махненко в 2004 г. присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины».

Талант ученого, душевная теплота и отзывчивость, доброжелательность и скромность снискали В. И. Махненко авторитет и уважение сварочной общественности. Многочисленные ученики, друзья и коллеги с глубокой скорбью переживают эту потерю, выражают искреннее соболезнование родным и близким Владимира Ивановича, всем, кто знал, любил и уважал его. Светлая память об этом человеке навсегда останется в их сердцах.

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

КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ в 2013 г. (сварка и родственные процессы)

Время проведения	Место проведения	Название выставки/конференции
22 января	Украина, Киев, ИЭС	Конференция «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин»
22–25 января	Украина, Киев	Украинская индустриальная выставка
Середина февраля	Украина, Карпаты, п. Плавьє	13-я Международная конференция «Материалы. Методы. Технологии»
18–22 февраля	Украина, Карпаты, Свалява	13-й Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства в промышленности и на транспорте»
19–21 февраля	Россия, Набережные Челны	«Машиностроение. металлообработка. Сварка-2013», проводимые в рамках восьмого Камского промышленного форума-2013
28 февраля–02 марта	Россия, Красноярск	Международная выставка «Литье и сварка»
26–29 марта	Россия, Новосибирск	Международная специализированная выставка «Машиностроение. металлообработка. Сварка. Металлургия-2013»
26–29 марта	Украина, Киев	Международная специализированная выставка «Металлообработка. Инструмент. Пластмасса»
09–12 апреля	Россия, Пермь	Международная выставка «Металлообработка. Сварка-2013»
09–12 апреля	Беларусь, Минск ЗАО «МинскЭкспо»	13-я Международная специализированная выставка «Сварка и резка-2013»
16–19 апреля	Россия, С.-Петербург	15-я Международная научно-практическая конференция «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика»
23–25 апреля	Украина, Киев Киев ЭкспоПлаза	Выставка «Сварка и родственные технологии»
12–14 марта	Россия, С.-Петербург	Международная выставка по обработке листового металла «Vech Russia 2013»
15–17 мая	Россия, Пермь	Международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль-2013» (посвящается 125-летию изобретения Н. Г. Славяновым электродуговой сварки правящимся электродом)
21–24 мая	Украина, Запорожье	Международная выставка «Машиностроение. Металлургия. Сварка»
22–24 мая	Украина, Киев	Международная научно-техническая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении»
22–25 мая	Украина, Ворзель, ИЭС	7-я научно-техническая конференция молодых ученых «Сварка и родственные технологии»
28 мая–1 июня	Украина, Крым, пос. Качивели	6-я Международная конференция «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов»
03–07 июня	Украина, Ялта	13-я Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий» с семинаром «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горно-металлургической и машиностроительной промышленности»
17–21 июня	Россия, пос. Агой Краснодарский край	7-я Международная научно-техническая конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»

Время проведения	Место проведения	Название выставки/конференции
25–27 июня	С.-Петербург, Россия «Алюсил МВиТ»	Третья международная конференция и выставка «Алюминий-21/Покрытия»
25–28 июня	Россия, Москва ООО «Мессе Дюссельдорф»	Schweißen&Schneiden Russia 2013 5-я Международная специализированная выставка сварки, резки и наплавки
26–28 июня	Россия, Нижний Новгород, ЗАО «Нижегородская ярмарка»	12-я Специализированная выставка «Машиностроение. Станки. Инструмент. Сварка-2013»
11–17 сентября	Германия, Эссен МИС	66-я Ассамблея Международного института сварки
16–21 сентября	Германия, Эссен Мессе Эссен	Международная выставка сварки, резки, обработки поверхностей «Schweissen und Schneiden 2013»
23–27 сентября	Украина, Ялта	13-я Международная научно-практическая конференция «Качество. Стандартизация. Контроль: Теория и практика»
29–30 сентября	Украина, Донецк	10-я Международная специализированная выставка «Металлургия-2013»
Начало октября	Украина, Крым, пос. Даниловка	21-я Международная конференция и блиц-выставка «Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»
02–05 октября	Украина, Краматорск	3-я Международная научно-техническая конференция «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития»
08–10 октября	Россия, Москва КВЦ «Сокольники»	Международная выставка «Weldex/Россварка»
16–18 октября	Россия, Челябинск	Международная выставка «Металлообработка. Сварка. Машиностроение»
19–22 ноября	Украина, Киев	12-й Международный промышленный форум-2013 с разделом Укрсварка (технологии, оборудование и материалы)
25–26 ноября	Украина, Киев ИЭС им. Е. О. Патона	Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее»
коней ноября– начало декабря	Украина, Киев, ИЭС	Восьмая международная научно-практическая конференция «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы»
03–05 декабря	Россия, Екатеринбург Уральские выставки	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«Автоматическая сварка» издается ежемесячно

с 1948 г. на русском языке, ISSN 005-111X;

«The Paton Welding Journal» издается с 2000 г.

на английском языке, ISSN 0957-798X

(перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка»)

Публикация статей в журнале бесплатная, гонорар не выплачивается.

1. Стандартный объем статьи 8–10 страниц текста (включая таблицы, библиографический список, реферат, 5-6 рисунков (объем обзорной статьи может быть увеличен до 12–14 страниц). Текст печатается через 1,5 интервала шрифтом Times New Roman, 12 кегль.

Материал должен быть изложен кратко, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте. На литературу, таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.

Рисунки не следует перегружать второстепенными данными. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ.

Публикацию статьи ускорит представление ее в электронном виде по e-mail в формате Word for Windows. Иллюстрации представляются в отдельных файлах в формате *.tif (300 dpi) для растровой графики или *.cdr (версии не выше 11.0, 600 dpi) для векторной.

2. В статье должно быть не более 5 авторов (других, принимавших участие в работе, можно указать в сноске). В сведениях об авторах следует указывать место работы и адрес, должность, ученую степень, адрес, телефон. Кроме того, следует указать почтовый адрес организации на русском и английском языках (лучше взять с официального сайта) и адрес электронной почты одного из авторов (организации).

3. Статья должна быть дополнена рефератом и ключевыми словами (от 7 до 10). Реферат (объем 1400–1600 знаков с одним пробелом между словами) должна достаточно полно раскрывать содержание статьи. В ней должны быть отражены цели и задачи, методы, результаты, область применения, выводы.

4. Каждая статья должна быть снабжена библиографическим списком, включающим не менее 8–10 ссылок (собственные работы авторов должны составлять не более четверти списка; ссылки на источники от 2000 г. обязательны).

Цитируемая в статье литература должна быть оформлена в следующем порядке:

для книг — фамилия, инициалы автора(ов), полное название, город, издательство, год издания, общее количество страниц;

для журнальных статей — фамилия, инициалы автора(ов), название статьи, журнал, год издания, номер, том, номер или выпуск, страницы; иностранные издания приводятся на языке оригинала;

для статей в сборнике — название статьи, авторы, название сборника, номер выпуска (или тома), место издания, издательство (или издающая организация), страницы начала и конца статьи; для интернет-ссылок: название ресурса, режим доступа.

5. Рукопись статьи должна быть подписана всеми авторами (или одним автором от имени авторского коллектива). К рукописи прилагается лицензионный договор по передаче авторских прав редакции журнала на публикацию статьи. Форма договора на сайте www.paton.kiev.ua или может быть выслана редакцией по электронной почте (по запросу). Несоответствие материалов указанным требованиям (пп. 1–5) может служить поводом для отказа в публикации.

6. Авторы статьи получают без оплаты по одному экземпляру соответствующих номеров журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal» (по запросу).

Контакты редакции журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»:

тел.: (38044) 200-63-02, 200-82-77.

E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.paton.kiev.ua; www.rucont.ru.

ПОДПИСКА — 2013 на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	2700 руб.	5400 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайте: <http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf.

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. и текущие выпуски 2012 г.

Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
- Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
- Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
- Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
- 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм
 - В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
 - Adobe Photoshop, версия до 7.0
 - QuarkXPress, версия до 7.0
 - Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию
- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 26.12.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 8,69. Усл.-отт. 8,94. Уч.-изд. л. 9,04 + 4 цв. вклейки.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.