



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

**Издатель:** Международная ассоциация «Сварка»

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

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

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

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

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

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

Цена договорная.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**Ющенко К. А., Савченко В. С., Червякова Л. В., Девид С., Витек Дж.** Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин ..... 3

**Борисов Ю. С., Зацерковный А. С., Кривцун И. В.** Конвективно-кондуктивный и радиационный теплообмен потока плазмы с частицами дисперсного материала в условиях плазменного напыления ..... 7

**Пентегов И. В., Петриенко О. И., Пустовойт С. В., Сидорец В. Н., Лавренюк А. В.** Определение падения напряжения в области контакта электродной проволоки с мундштуком горелки при механизированных способах дуговой сварки ..... 12

**Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Наумейко С. М., Билинец А. В.** Влияние состава сердечника порошковой проволоки и защитного газа на стабильность процесса дуговой сварки ..... 18

**Шейко П. П., Жерносеков А. М., Лозовская А. В., Шимановский Ю. С.** Применение двухканальной системы автоматической стабилизации процесса импульсно-дуговой сварки для улучшения качества соединений ..... 23

**Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д.** Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки ..... 27

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

**Бернадский В. Н.** Сталь и сварка в строительстве ..... 32

**Рябцев И. А.** Высокопроизводительная широкоослойная наплавка электродными проволоками и лентами (Обзор) ..... 36

**Матвеев В. В.** Наплавка гребней вагонных колес после отжига поверхности катания на вагоноремонтных заводах Украины ..... 42

**Скульский В. Ю., Моравецкий С. И.** Присадочные материалы для автоматической сварки под флюсом теплоустойчивых сталей с 9 % хрома ..... 49

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

**Зайффарт П.** Использование волоконного лазера мощностью 10 кВт ..... 51

**Орлов Л. Н., Голякевич А. А., Упырь В. Н., Гиок С. П.** Порошковая проволока для сварки в судостроении ..... 52

Новости ..... 54

Диссертация на соискание ученой степени ..... 56

Патенты и заявки в области сварочного производства ..... 56

По зарубежным журналам ..... 58

Новые книги ..... 63

**ХРОНИКА**

Научно-практический семинар для руководителей и специалистов в области сварочного производства ..... 65

Международный семинар «Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование» ..... 66

Международная выставка материалов, оборудования и технологий «Сварка. Родственные технологии 2005» ..... 68

Наши поздравления ..... 71

**ИНФОРМАЦИЯ** ..... 73

Разработано в ИЭС ..... 26, 31, 41, 48

# Avtomaticheskaya Svarka

## (Automatic Welding)

№ 6 (624)  
June 2005

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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

**Publisher:** International Association «Welding»

### EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

**B. E. PATON**

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

### THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

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

### Address:

The E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23  
Fax: (38044) 268 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
<http://www.nas.gov.ua/pwj>

### Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina  
*Electron galley:*  
I. S. Batasheva, A. I. Sulima,  
I. R. Naumova,  
I. V. Petushkov

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

## CONTENTS

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Yushchenko K. A., Savchenko V. S., Chervyakova L. V., David S., Vitek J.** Study of weldability of nickel special alloys and development of technology of repair of gas turbine blades ..... 3
- Borisov Yu. S., Zatserkovny A. S., Krivtsun I. V.** Convective-conductive and radiation heat exchange of plasma flow with particles of dispersed material under conditions of plasma spraying ..... 7
- Pentegov I. V., Petrienko O. I., Pustovoi S. V., Sidorets V. N., Lavrenyuk A. V.** Determination of voltage drop in the area of contact of electrode wire with a torch nozzle in mechanized methods of arc welding ..... 12
- Shlepakov V. N., Kotelchuk A. S., Naumejko S. M., Bilinets A. V.** Effect of composition of flux-cored wire core and shielding gas on the arc welding stability ..... 18
- Sheiko P. P., Zhernosekov A. M., Lozovskaya A. V., Shimanovsky Yu. S.** Two-channel system of automatic stabilization in pulsed-arc consumable electrode welding ..... 23
- Ryzhov R. N., Kuznetsov V. D.** Selection of optimum parameters of external electromagnetic action in arc methods of welding ..... 27

### INDUSTRIAL

- Bernadsky V. N.** Steel and welding in civil engineering ..... 32
- Ryabtsev I. A.** High-efficiency wide-band surfacing using electrode wires and strips (Review) ..... 36
- Matveev V. V.** Surfacing of railway car wheel flanges after annealing of a rolling surface at car-repair plants in Ukraine ..... 42
- Skulsky V. Yu., Moravetsky S. I.** Filler materials for automatic submerged arc welding of heat-resistant steels with 9 % Cr ..... 49

### BRIEF INFORMATION

- Seyffarth P.** Application of fiber laser of 10 kW capacity ..... 51
- Orlov L. N., Golyakevich A. A., Upyr V. N., Giyuk S. P.** Flux-cored wire for welding in ship building ..... 52
- News ..... 54
- Thesis for scientific degree ..... 56
- Patents in the field of welding ..... 56
- Review of foreign journals ..... 58
- New books ..... 63

### NEWS

- Scientific-practical seminar for managers and specialists in the field of welding ..... 65
- International seminar «Flash-butt welding and other types of pressure welding. Technology and equipment» ..... 66
- International Show of materials, equipment and technologies «Welding. Allied Processes 2005» ..... 68
- Our congratulations ..... 71

### INFORMATION

- Developed at the PWI ..... 26, 31, 41, 48

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



# ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ НИКЕЛЕВЫХ СУПЕРСПЛАВОВ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Л. В. ЧЕРВЯКОВА**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**С. ДЕВИД**, **Дж. ВИТЕК**, доктора (OAK Ridge National Laboratory, USA)

Описаны работы по оценке свариваемости суперсплавов на основе никеля, применяемых при изготовлении лопаток газовых турбин. Содержание упрочняющей  $\gamma$ -фазы в сплавах достигает 60 %. Предложена технология восстановления лопаток методом плазменно-порошковой наплавки.

*Ключевые слова:* плазменно-порошковая наплавка, никелевые суперсплавы, лопатки газовых турбин, упрочняющая  $\gamma$ -фаза, провал пластичности, технология восстановления

Основными сплавами с высокими высокотемпературными механическими свойствами, используемыми для изготовления газотурбинных двигателей, являются суперсплавы на основе никеля. Поскольку в последние годы требования к температуре эксплуатации двигателей значительно повысились, модификации сплавов привели к увеличению в микроструктуре никелевых сплавов упрочняющей  $\gamma$ -фазы (более 45 %). Удовлетворяя эксплуатационным свойствам, эти материалы имеют плохую свариваемость (при сварке и термообработке они склонны к образованию горячих трещин).

Настоящая работа выполнена в рамках Украинско-американского проекта по партнерству «Ремонтная сварка и пайка компонентов двигателей и паровых турбин» за счет средств УНТЦ. С американской стороны в проекте приняли участие OAK Ridge National Laboratory, OAK Ridge, Tennessee United States (U.S.) Department of Energy's, Pratt and Whitney-Paton, с украинской — Институт электросварки им. Е. О. Патона и Международное объединение «Интерм».

Цель проекта — усовершенствование и внедрение ремонтных технологий сварки и пайки компонентов из суперсплавов на основе никеля, используемых в авиадвигателях и наземных газовых турбинах, что дает возможность уменьшить расходы на их восстановление и изготовление. Для исследований выбраны сплавы ЧС-70 и ЖС-26, применяемые сегодня при производстве лопаток газовых турбин наземных установок и авиационных двигателей.

Сплав ЧС-70 относится к суперсплавам на никелевой основе с упрочнением  $\gamma$ -фазой, количество которой достигает 50...55 %. При литье обеспечивается равноосная структура, гарантирующая после соответствующей термообработки (аустени-

зации и старения) высокие прочностные (в том числе при повышенных температурах) свойства.

Сплав ЖС-26 является сплавом на никелевой основе с высоким количеством элементов, способствующих образованию  $\gamma$ -фазы. Среднее содержание фазы достигает 60...65 %. Специальная технология литья обеспечивает направленную кристаллизацию в лопатке. Термообработка состоит в аустенизации для устранения междендритной неоднородности (при 1265 °С) и старения. После старения образуются упрочняющие  $\gamma$ -фазы с графцентрированной кубической решеткой и оптимальным размером 0,3...0,5 мкм преимущественно кубической формы.

Химический состав и механические свойства сплавов ЧС-70 и ЖС-26 приведены в таблице. Никелевые суперсплавы являются сложнoleгированными материалами, имеющими в составе ряд элементов, ограниченно растворимых в  $\gamma$ -твердом растворе. Значительная химическая неоднородность металла и развитие термомодеформационных процессов способствуют образованию при сварке плавлением дефектов типа горячих трещин [1]. Для количественной оценки свариваемости использовали динамическое деформирование свариваемых образцов на испытательной установке типа Vareststraint Test [2]. При этом возможна оценка пластичности металла шва в температурном ин-

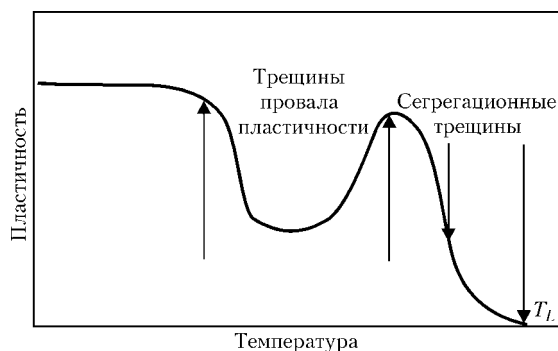


Рис. 1. Зависимость температуры от пластичности металла шва с зонами образования сегрегационных трещин и трещин провала пластичности



**Химический состав и механические свойства сплавов ЧС-70 и ЖС-26 при кратковременном растяжении**

Марка сплава	Массовая доля элементов, %											
	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ce	Fe	B
ЧС-70	Основа	0,6...0,12	15...16,7	9,5...12,5	1,5...2,5	4,5...6,5	2,4...3,2	4,2...5,0	0,10...0,25	0,05	≤ 0,8	≤ 0,2
ЖС-26	»»	0,13...1,18	4,3...5,6	8,0...10,0	0,8...1,4	10,9...12,5	5,5...6,2	0,8...1,2	1,1...1,8	0,025	1,0	0,015

**Продолжение таблицы**

Марка сплава	Температура испытаний, °С	Механические свойства			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
ЧС-70	20	850	750	3	Не опр.
	600	960	Не опр.	6	9,3
	900	Не опр.	»»	Не опр.	Не опр.
ЖС-26	20	860...930	790	8...16	11...13
	800	910...1030	760...890	8...18	9...20
	900	850...880	840	16...21	19...23



Рис. 4. Внешний вид установки для исследования линейного расширения металлов

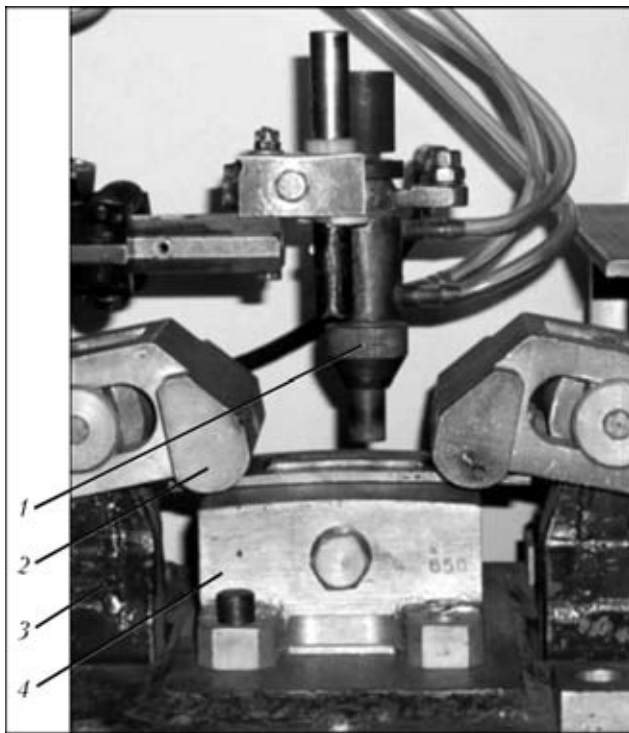


Рис. 2. Внешний вид рабочего угла установки и составного образца (оправки для изгиба радиусом 650 мм): 1 — горелка ТИГ; 2 — зажим; 3 — образец; 4 — оправка

тервале «температура кристаллизации — комнатная температура». Обобщающая кривая изменения пластичности приведена на рис. 1. Учитывая, что конструктивные элементы из рассматриваемых материалов могут быть получены только литьем и имеют



Рис. 3. Внешний вид образца из сплава ЧС-70 после высокотемпературных испытаний

ограниченные размеры, для исследований использовали составные образцы.

Внешний вид рабочего узла установки для проведения опытов по оценке свариваемости сплавов приведен на рис. 2. Толщина испытуемых образцов составляла 1,7 мм. Проплавление образцов при испытаниях осуществляли сваркой ТИГ на следующем режиме:  $I_{св} = 70$  А;  $U_{д} = 10,5$  В;  $v_{св} = 8,5$  м/ч; расход аргона 10 л/мин.

При исследовании литых образцов сплава ЖС-26 с направленной кристаллизацией в области сварного шва и металле ЗТВ находился монокристалл с направлением {001}. Высокотемпературные механические свойства металла оценивали на установке АЛА-ТОО, принцип действия которой аналогичен испытательной машине типа «Сleeb1».

Испытания проводили в вакуумной камере. Внешний вид образца после испытаний приведен на рис. 3. Рабочую часть образца исследуемых материалов вваривали в плоские захваты. Благодаря такой конструкции образца при необходимости возможна оценка свойств металла из пера реальной лопатки. При исследовании лопаток, бывших в эксплуатации, предварительно проводили восстановительную термообработку и таким образом оценивали свариваемость металла.

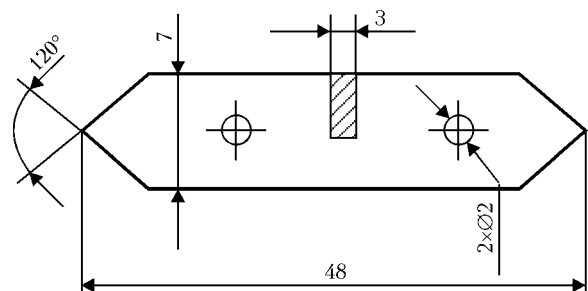


Рис. 5. Схема образца для проведения дилатометрических исследований

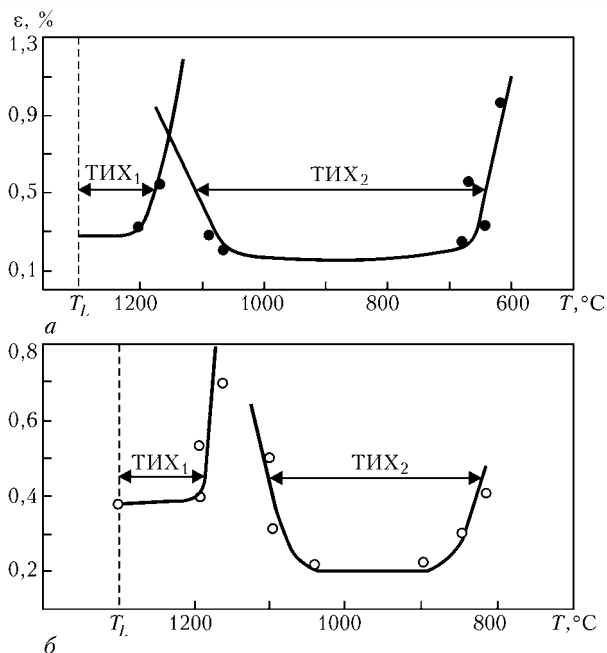


Рис. 6. Высоко- (ТИХ<sub>1</sub>) и низкотемпературные (ТИХ<sub>2</sub>) интервалы хрупкости сплавов ЧС-70 (а) и ЖС-26 (б)

Важнейшей характеристикой, определяющей кинетику термомеханического состояния в области сварочной ванны, является коэффициент линейного расширения металла, определяющий его объемные изменения при нагреве и остаточные напряжения. Коэффициент линейного расширения определяли на специализированной дилатометрической установке бесконтактным методом, что обеспечивает высокую точность измерений вплоть до температуры плавления.

Внешний вид установки для исследования линейного расширения металлов и схема образца при-

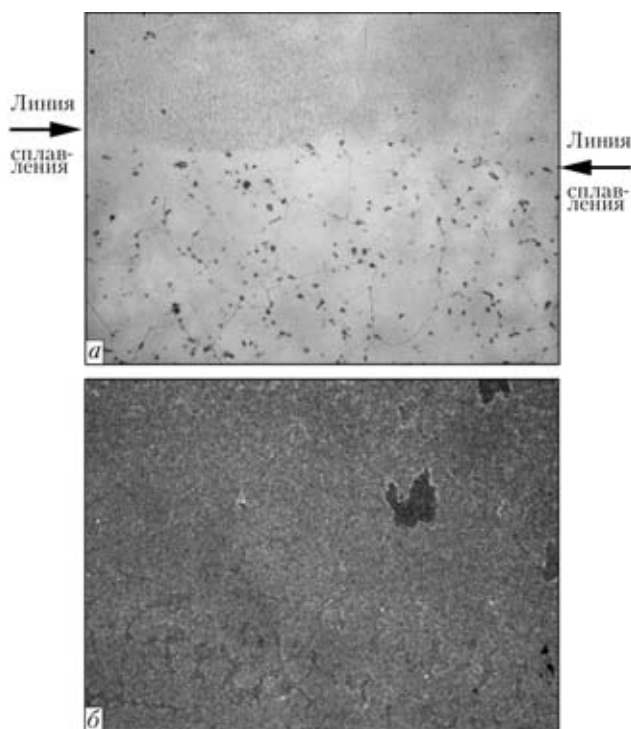


Рис. 7. Микроструктура металла шва (X100) при сварке сплавов ЧС-70 (а) и ЖС-26 (б)

ведены соответственно на рис. 4 и 5. В результате металлографических исследований, выполненных с использованием оптической и электронной сканирующей микроскопии, построены температурные интервалы хрупкости (ТИХ) сплавов ЧС-70 и ЖС-26 (рис. 6). Анализ кривых, полученных на сплаве ЧС-70 с равноосной структурой показывает, что наблюдается тенденция повышения критической величины деформации в ТИХ<sub>1</sub>. При этом свариваемость сплава определяет поведение металла шва в ТИХ<sub>2</sub>. В еще большей мере эта особенность проявляется при оценке свариваемости сплава ЖС-26. Кроме того, пороговые значения деформации в ТИХ<sub>1</sub> и ТИХ<sub>2</sub> для сплава ЖС-26 выше соответствующих параметров сплава ЧС-70, несмотря на более сложную систему легирования сплава ЖС-26. Можно предложить, что это связано с условиями кристаллизации обоих сплавов. У сплава ЧС-70, имеющего равноосную структуру, в шве обычная структура равноосных кристаллов с наличием вытянутых зерен, растущих от полуплавленных зерен основного металла. Наблюдаются большеугольные границы зерен, по которым проходят преимущественно горячие трещины.

При сварке сплава ЖС-26 с направленной структурой, когда в области выполнения сварного шва находится практически монокристалл, в шве происходит наследование структуры основного металла. Отсутствуют границы зерен, являющиеся источниками хрупкого межзеренного разрушения [3, 4]. В результате пластичность металла шва в ТИХ<sub>1</sub> и ТИХ<sub>2</sub> повышается. Характерные структуры металла швов, подтверждающие такие представления, приведены на рис. 7. Они подтверждаются также сравнительными исследованиями вы-

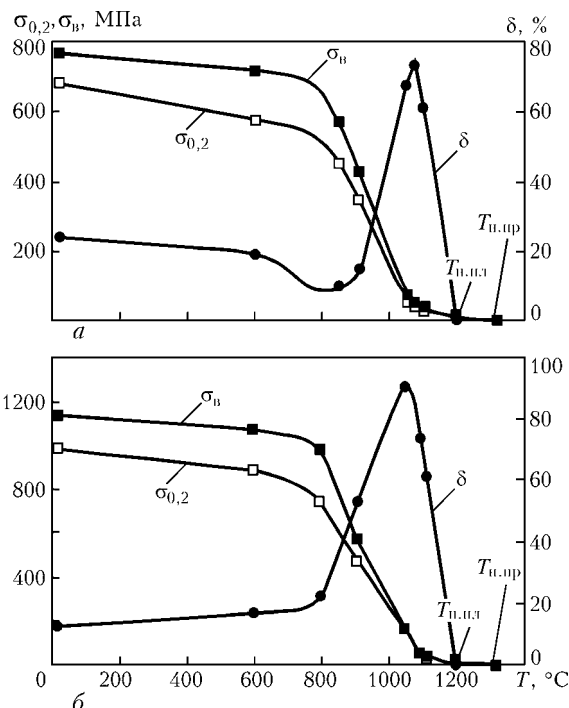


Рис. 8. Зависимость прочности и пластичности металла швов соединений сплавов ЧС-70 (а) и ЖС-26 (б) от температуры (Т<sub>н.пр</sub>, Т<sub>н.пл</sub> — температура соответственно нулевой прочности и пластичности)

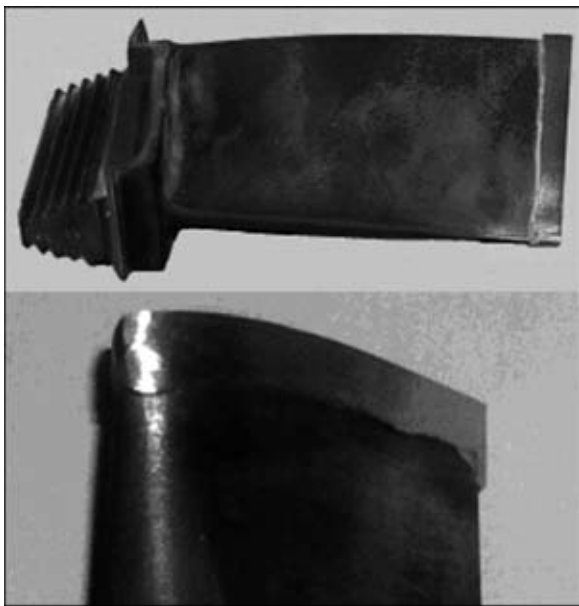


Рис. 9. Внешний вид лопаток газовых турбин, восстановленных сваркой

сокотемпературных механических свойств металла швов (рис. 8) соединений суперсплавов ЧС-70 и ЖС-26 на установке АЛА-ТОО типа «Cleebl».

Выполнение технологических проб на исследуемых сплавах путем заварки сварных образцов на пластинах размерами 5×50×80 мм показало, что сплав ЖС-26 в меньшей мере подвержен образованию горячих трещин по сравнению со сплавом ЧС-70, что подтверждают данные о свариваемости этих сплавов.

Значительный объем исследований в проекте занимает компьютерное моделирование термомеханических процессов в области сварного шва при сварке никелевых суперсплавов ЧС-70 и ЖС-26, а также вклад структурных изменений в металл ЗТВ на динамику изменения таких процессов. Структурные исследования выполняли на высокотемпературном лазерном дилатометре.

Результаты измерения коэффициента термического расширения образцов сплавов показывают, что значительный вклад в термическое расширение металла при нагреве оказывает  $\gamma \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma$  превращение, проходящее с увеличением объема. Такая закономерность возможна, когда межплоскостные расстояния  $\gamma'$ -фазы меньше, чем соответствующие параметры матрицы с аустенитной структурой. Максимальные значения коэффициента термического расширения при температурах, близких к  $T_s$ , составляют для сплава ЧС-70 и ЖС-26 соответственно  $60 \cdot 10^{-6}$  и  $44 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Эти реальные показатели заметно превышают табличные данные и определяют развитие значительных упругопластических деформаций.

Расчет таких деформаций реализован с использованием разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона

The paper describes studies on evaluation of weldability of nickel-base superalloys, applied in manufacture of gas turbine blades. The content of the strengthening  $\gamma'$ -phase in the alloys reaches 60 %. A technology is proposed for blade reconditioning by plasma-powder surfacing.

компьютерной программы, учитывающей значения реальных физических свойств, в том числе приведенных выше значений коэффициента термического расширения. Расчет выполняли для суперсплава ЧС-70 и для сравнения для стабильноаустенитной высоколегированной стали, не претерпевающей фазовых превращений при нагреве и охлаждении. Анализ полученных результатов показал, что в металле ЗТВ сплава под действием термического цикла сварки развиваются значительные пластические деформации, суммарное значение которых с учетом двухосного напряженного состояния может превышать показатели пластичности сплава и приводить к образованию трещин при сварке [5].

Опробована ремонтная сварка лопаток газовых турбин из сплава ЧС-70 (рис. 9). Исследование микроструктуры наплавленного металла показало отсутствие дефектов. Механические свойства на отремонтированных участках модельных образцов показали, что свойства металла шва приближаются к характеристикам основного металла.

Выборочную партию лопаток, отремонтированную по разработанной технологии, подвергали циклическим испытаниям на динамическом стенде с целью определения предела усталости таких лопаток. Усталостные испытания, проведенные на резонансной частоте пера лопатки, показали, что отремонтированные лопатки обладают хорошей работоспособностью.

## Выводы

1. Выполнены исследования свариваемости суперсплавов на основе никеля применительно к лопаткам газовых турбин.
2. Разработана промышленная технология восстановления лопаток газовых турбин с использованием плазменно-порошковой наплавки.

*Участники проекта выражают особую признательность сотрудникам Украинского научно-технологического центра за постоянную помощь в обеспечении и выполнении этого проекта.*

1. Sims C. T., Stoloff N. S., Hagel W. C., Superalloys II. — New York: Wiley-Interscience publ., 1995. — 384 p.
2. Savage W. F., Lundin G. D. The Vareststraint test // Welding J. — 1965. — 44, № 10. — P. 433-442.
3. Буханова А. А., Толорайя В. Н. О структуре и свойствах монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе. — М.: Наука, 1984. — С. 213-217.
4. Stray grain formation in single crystal Ni-base superalloy welds / I. W. Park, S. S. Babu, I. M. Vitek et al. // J. Appl. Phys. — 2003. — 94, № 6. — P. 4203-4209.
5. Влияние физических характеристик литых никелевых жаропрочных сплавов на развитие термомеханических процессов при сварке плавлением / В. С. Савченко, К. А. Юценко, В. И. Махненко и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 11. — С. 6-9.

Поступила в редакцию 09.09.2004



# КОНВЕКТИВНО-КОНДУКТИВНЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПОТОКА ПЛАЗМЫ С ЧАСТИЦАМИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, А. С. ЗАЦЕРКОВНЫЙ, инж., И. В. КРИВЦУН, д-р техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны физические процессы, определяющие тепловое воздействие плазменной струи на частицы дисперсных материалов при плазменном напылении покрытий. Проанализированы различные критериальные зависимости, используемые для расчета конвективно-кондуктивной составляющей теплового потока через поверхность сферической частицы, обтекаемой потоком низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении. Предложена методика расчета характеристик радиационного теплообмена плотной плазмы с поверхностью металлической частицы. В широком диапазоне параметров невозмущенного плазменного потока (аргоновая плазма) и температуры поверхности частицы (алюминий) проведен численный анализ рассмотренных составляющих потока тепла в частицу. Показано существенное влияние радиационного теплообмена на результирующий тепловой поток через поверхность напыляемой частицы.

*Ключевые слова:* плазменное напыление, дисперсный материал, частица, плазменная струя, плазма, теплообмен, тепловой поток, излучение

Сложность экспериментального исследования процессов, протекающих в системе плазменная струя–дисперсный материал при плазменном напылении покрытий, обуславливает необходимость теоретического изучения и численного анализа совокупности факторов, определяющих тепловое и динамическое воздействие потока ионизированного газа (плазмы) на частицы напыляемого материала. Существует множество подходов и моделей для расчета теплового потока из плазмы в обтекаемую ею одиночную частицу, в которых учитываются различные механизмы теплообмена в рассматриваемой системе [1–5]. Выбор той или иной модели теплообмена, дающей приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных данных, во многом определяется давлением, температурой и скоростью набегающего потока плазмы, температурой поверхности частицы, ее формой и размерами. В условиях плазменного напыления указанные характеристики могут претерпевать значительные изменения по мере движения напыляемой частицы в плазменной струе, в результате чего вклад каждого из механизмов теплообмена в результирующий поток тепла из плазмы на поверхность частицы может существенным образом изменяться по дистанции напыления. Поэтому представляет интерес сравнительный анализ этих механизмов в широком диапазоне изменения температуры плазмы, а следовательно, и степени ее ионизации, температуры частицы и их относительной скорости.

Целью данной работы является анализ отдельных процессов теплового воздействия потока ионизированного газа на частицу дисперсного материала в характерных для условий дозвукового

плазменного напыления диапазонах значений температур плазмы (от 3000 до 15000 К) и поверхности частицы (от комнатной до температуры кипения материала и выше), а также их относительной скорости (от 0 до 600 м/с).

Рассмотрим основные механизмы обмена энергией между потоком изотермической плазмы при атмосферном давлении и помещенной в него частицей дисперсного материала, которая имеет сферическую форму. Предположим, что радиус частицы  $a$  существенно больше характерной длины свободного пробега  $\lambda$  частиц окружающей плазмы (число Кнудсена  $Kn = \lambda/a \ll 1$ ). Например, для аргоновой плазмы атмосферного давления, имеющей температуру около 10000 К, это условие выполняется при  $a > 25$  мкм [2]. В рассматриваемых условиях энергообмен между плазмой и частицей дисперсного материала определяется совокупностью следующих физических процессов:

- конвективно-кондуктивным теплообменом набегающего потока с поверхностью частицы, обусловленным передачей поверхности материала энергии теплового (хаотического) движения частиц плазмы;
- обменом энергией теплового излучения между плазмой и частицей;

- передачей поверхности материала потенциальной энергии заряженных частиц плазмы (энергии, выделяющейся при рекомбинации ионов), энергии направленного движения электронов, достигающих поверхности, а также дополнительной кинетической энергии ионов, которую они приобретают в электрическом поле, формирующемся вблизи поверхности частицы;

- охлаждением поверхности частицы за счет уноса потоком пара энергии испарения атомов ее материала.

В случае обтекания частицы плазмой молекулярных газов необходимо также учитывать пере-



дачу поверхности материала частицы потенциальной энергии атомов газа, выделяющейся при образовании молекул. Если в дальнейшем ограничиться рассмотрением плазмы атомарных (инертных) газов, то локальный энергетический баланс поверхности сферической частицы, находящейся в плазменном потоке, можно записать следующим образом:

$$-\left(\chi_m \frac{\partial T_m}{\partial r}\right)_{r=a} = Q_c + Q_r + Q_i + Q_e - Q_v,$$

где  $\chi_m$  — коэффициент теплопроводности материала частицы;  $T_m(r)$  — температурное поле в частице, которое предполагается сферически симметричным;  $r$  — расстояние от центра частицы;  $Q_c$  — конвективно-кондуктивный тепловой поток из плазмы в частицу;  $Q_r$  — результирующая плотность потока энергии теплового излучения (предполагается, что тепловое излучение плазмы поглощается в тонком приповерхностном слое материала частицы);  $Q_i$ ,  $Q_e$  — плотность потоков энергии, приносимой на поверхность частицы соответственно ионами и электронами плазмы;  $Q_v$  — плотность потока энергии испарения, уносимой с поверхности частицы струей пара.

Исследуем конвективно-кондуктивный и радиационный теплообмен в рассматриваемой системе. При описании конвективно-кондуктивной составляющей теплообмена плазма может рассматриваться как сплошная среда, характеризующаяся при заданной температуре определенными значениями теплофизических параметров и коэффициентов переноса. В этом случае для расчета  $Q_c$  можно использовать ньютоновскую модель теплообмена [6]:

$$Q_c = \alpha(T_p - T_{ms}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплообмена;  $T_p$  — температура невозмущенного потока плазмы;  $T_{ms}$  — температура поверхности частицы.

Коэффициент теплообмена для сферической частицы может быть рассчитан, если известно число Нуссельта [7]:

$$Nu = (\alpha d) / \chi, \quad (2)$$

где  $d = 2a$  — диаметр частицы;  $\chi$  — коэффициент теплопроводности плазмы, вычисленный при температуре невозмущенного потока.

Для определения числа Nu существует большое количество критериальных зависимостей (например, [8]), которые при одних и тех же режимах обтекания частицы отличаются друг от друга. Обобщенную форму записи наиболее характерных из них можно представить в следующем виде [1]:

$$Nu = A + B Re^m Pr^n, \quad (3)$$

где  $Re$  — число Рейнольдса, имеющее вид  $(\rho u d) / \eta$ ;  $Pr$  — число Прандтля, имеющее вид  $(C_p \eta) / \chi$ ;  $u$  — невозмущенная скорость плазменного потока по отношению к частице;  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $C_p$  — соответственно плотность, коэффициент динамической вязкости и удельная теплоемкость плазмы при температуре невозмущенного потока. Пер-

вое слагаемое в правой части выражения (3) описывает теплообмен между плазмой и частицей за счет кондуктивной теплопроводности, а второе — за счет конвективного переноса энергии теплового движения частиц плазмы. Величины  $A$  и  $B$  так же, как и показатели степени  $m$ ,  $n$  при числах  $Re$  и  $Pr$ , изменяются в достаточно широких пределах [1, 8]. Так, например, в работе [9] предложена критериальная зависимость

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (4)$$

с помощью которой достаточно хорошо описан конвективно-кондуктивный теплообмен в рассматриваемой системе при небольшом различии температуры невозмущенного потока плазмы и температуры поверхности частицы. Для оценок числа Nu при значительном разрыве  $T_p$  и  $T_{ms}$  и больших значениях скорости набегающего потока ( $Re = 45$ ) в [1] предложено ввести в конвективную составляющую приведенной зависимости поправку, учитывающую изменение плотности и вязкости плазмы по толщине теплового пограничного слоя вокруг частицы:

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \left( \frac{\rho \eta}{\rho_s \eta_s} \right)^{0,2}, \quad (5)$$

а в работе [10] предложено использовать подобную поправку для всего выражения (4):

$$Nu = (2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \left( \frac{\rho \eta}{\rho_s \eta_s} \right)^{0,6}. \quad (6)$$

Здесь и далее величины с индексом  $s$  означают соответствующие свойства плазмы, определенные при температуре поверхности частицы.

Проведенный в работах [1, 11] анализ нагрева сферических частиц в высокотемпературном плазменном потоке показал, что в области малых значений числа  $Re$  выражения (4), (5) могут давать завышенные значения числа Nu по сравнению со значениями, определенными экспериментально. Причиной этого является существенное изменение в пределах теплового пограничного слоя коэффициента теплопроводности плазмы, определяющего кондуктивный теплообмен. Для устранения этой неточности в [1] предложено ввести поправку к кондуктивной составляющей критериальной зависимости (5) в виде отношения коэффициентов теплопроводности плазмы при температуре поверхности частицы и температуре невозмущенного потока:

$$Nu = 2 \frac{\chi_s}{\chi} + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \left( \frac{\rho \eta}{\rho_s \eta_s} \right)^{0,2}. \quad (7)$$

Близкая зависимость, полученная на основе обработки экспериментальных данных по поперечному обтеканию цилиндров и сфер потоком аргоновой плазмы атмосферного давления, ранее предложена в работе [11]:



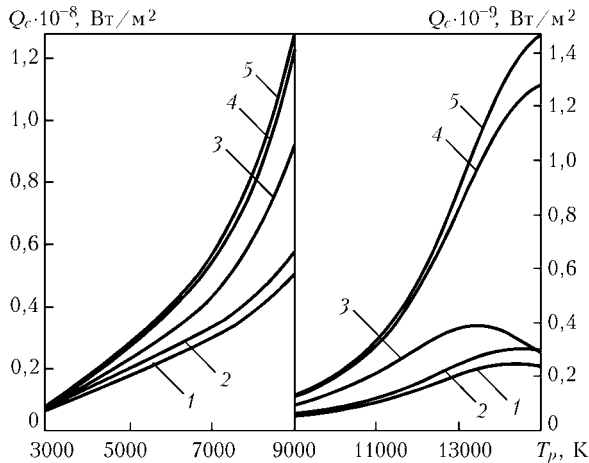


Рис. 1. Зависимость конвективно-кондуктивной составляющей теплового потока в частицу от температуры плазмы при  $u = 300$  м/с и  $T_{ms} = 2000$  К, рассчитанная на основе различных выражений для числа Nu: 1 — по формуле (8); 2 — (7); 3 — (6); 4 — (5); 5 — (4)

$$Nu = 2 \frac{\chi_s}{\chi} + 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,4} \left( \frac{\rho \eta}{\rho_s \eta_s} \right)^{0,2} \quad (8)$$

На рис. 1–3 представлены результаты численного анализа зависимостей теплового потока  $Q_c$ , вводимого в частицу радиусом  $a = 30$  мкм изотермической аргоновой плазмой атмосферного давления, от температуры и скорости невозмущенного потока плазмы, а также от температуры поверхности частицы. Расчеты выполнены по (1) и (2) при использовании различных форм записи числа Nu (4)–(8), необходимые значения теплофизических свойств и коэффициентов переноса аргоновой плазмы взяты из работы [12]. Полученные расчетные данные показали, что при небольшом различии в значениях  $T_p$  и  $T_{ms}$  все рассмотренные критериальные зависимости дают малые, близкие по величине значения теплового потока в частицу (см. рис. 1). При увеличении разности температур  $T_p$ ,  $T_{ms}$  значения  $Q_c$  вначале возрастают. Затем при использовании критериальных зависимостей (6)–(8) наблюдается некоторое снижение расчетных значений теплового потока, причем влияние поправочных коэффициентов в формулах (5)–(8) на  $Q_c$  весьма существенно (см. рис. 1, 3). Это связано со значительными изменениями плотности, коэффициентов теплопроводности и динамической вязкости аргона в исследуемом диапазоне изменения температур  $T_{ms}$ ,  $T_p$ . Что касается  $u$ , то ее увеличение сопровождается монотонным возрастанием значений теплового потока в частицу, происходящим примерно одинаково для всех рассматриваемых форм записи числа Nu (см. рис. 2). В дальнейшем для расчета  $Q_c$  в рамках данной работы используется критериальная зависимость (8), которая дает наилучшее совпадение с экспериментальными данными в случае обтекания частицы потоком аргоновой плазмы [11].

Теплофизические процессы при плазменном напылении протекают в диапазоне температур, где важную роль может играть радиационный теплообмен между плазменной струей и частицами на-

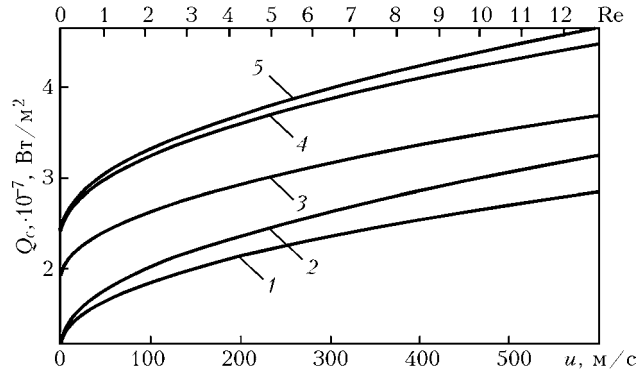


Рис. 2. Зависимость конвективно-кондуктивной составляющей теплового потока от скорости плазмы относительно частицы при  $T_p = 6000$  К и  $T_{ms} = 2000$  К (см. обозначения рис. 1)

пыляемого материала. Исследуем эту составляющую энергообмена с учетом сделанного ранее предположения, что излучение плазмы, падающее на частицу, поглощается в тонком приповерхностном слое ее материала (данное предположение оправдано, например, для металлических частиц радиусом более 1 мкм [13]). В рассматриваемом случае  $Q_r$  может быть вычислена с помощью известного соотношения [6]:

$$Q_r = \xi \sigma_0 (T_p^4 - T_{ms}^4), \quad (9)$$

где  $\xi$  — усредненная по спектру теплового излучения приведенная степень черноты для системы плазма–поверхность частицы;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана–Больцмана.

Для оценки приведенной степени черноты  $\xi$ , определяющей эффективность радиационного теплообмена между плотной плазмой (плазмой атмосферного давления) и помещенной в нее металлической частицей, можно воспользоваться формулой из работы [14], описывающей теплообмен излучением между двумя поверхностями — поверхностью металла, которую при рассматриваемых условиях ( $a > 25$  мкм) можно считать практически плоской и имеющей температуру  $T_{ms}$ , и граничащей с ней поверхностью плазмы, предполагаемой полуограниченной и пространственно-

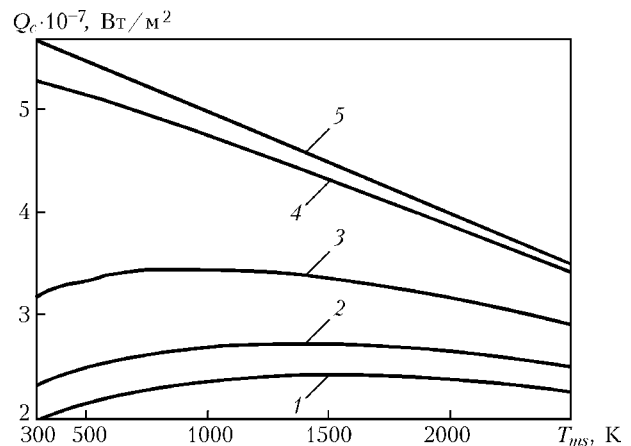


Рис. 3. Зависимость конвективно-кондуктивной составляющей теплового потока в частицу от температуры ее поверхности при  $T_p = 6000$  К,  $u = 300$  м/с (см. обозначения рис. 1)



однородной с температурой  $T_p$ ;

$$Q_r = \frac{\hbar}{4\pi^3 c^2} \int_0^\infty \xi_\omega \omega^3 \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT_p}\right) - 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT_{ms}}\right) - 1} \right] d\omega, \quad (10)$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ;  $c$  — скорость света;  $\omega$  — частота излучения;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\xi_\omega$  — спектральное распределение приведенной степени черноты, которое в случае двух плоскопараллельных поверхностей может быть определено с помощью соотношения

$$\xi_\omega = \int_0^{\pi/2} (\xi_\omega^\perp + \xi_\omega^\parallel) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta, \quad (11)$$

где

$$\xi_\omega^{\perp, \parallel} = \frac{\Gamma_{m\omega}^{\perp, \parallel} \Gamma_{p\omega}^{\perp, \parallel}}{\Gamma_{m\omega}^{\perp, \parallel} + \Gamma_{p\omega}^{\perp, \parallel} - \Gamma_{m\omega}^{\perp, \parallel} \Gamma_{p\omega}^{\perp, \parallel}} \quad [15];$$

$\vartheta$  — угол падения;  $\Gamma_{m, p\omega}^{\perp, \parallel}(T_{ms, p}, \vartheta)$  — соответствующие указанным значениям температуры и угла падения коэффициенты поглощения плоских электромагнитных волн полуограниченной изотропной плазмоподобной средой (индекс  $m$  соответствует металлу, а индекс  $p$  — плазме) для двух независимых поляризаций, вычисляемые как [15]

$$\Gamma_{m, p\omega}^{\perp, \parallel} = - \frac{4 \operatorname{Re}(r_{m, p\omega}^{\perp, \parallel})}{|1 - r_{m, p\omega}^{\perp, \parallel}|^2}, \quad (12)$$

причем знаки  $\perp$  и  $\parallel$  соответствуют случаю падения волны с вектором электрического поля соответс-

твенно перпендикулярным и параллельным плоскости падения. Величины  $r_{m, p\omega}^{\perp, \parallel}$ , пропорциональные поверхностным импедансам полуограниченного металла (плазмы) [15], в пренебрежении пространственной дисперсией диэлектрической проницаемости обеих сред могут быть записаны следующим образом:

$$r_{m, p\omega}^\perp = - \frac{\cos \vartheta}{\sqrt{\varepsilon_{m, p}(\omega) - \sin^2 \vartheta}}; \quad (13)$$

$$r_{m, p\omega}^\parallel = - \frac{\sqrt{\varepsilon_{m, p}(\omega) - \sin^2 \vartheta}}{\varepsilon_m(\omega) \cos \vartheta},$$

где  $\varepsilon_{m, p}(\omega)$  — комплексная диэлектрическая проницаемость неограниченного металла (плазмы) на частоте  $\omega$ , которая в используемом приближении «холодной» плазмоподобной среды имеет вид

$$\varepsilon_{m, p}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{m, pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_{m, pe})}, \quad (14)$$

где  $\omega_{m, pe} = \left( \frac{4\pi e^2 n_{m, pe}}{m_e} \right)^{1/2}$  и  $\nu_{m, pe}$  — соответственно плазменная и эффективная частота столкновений электронов в металле (плазме);  $n_{m, pe}$  — их концентрация, зависящая от температуры соответствующей среды;  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона.

Прежде, чем провести количественный анализ роли радиационной составляющей теплообмена в полном энергетическом балансе поверхности напыляемой частицы, определим значение  $\xi$ , приравнявая результаты вычисления теплового потока  $Q_r$  по (9) и (10) с использованием выражений (11)–(14). Так, например, в случае частицы алюминия, находящейся в аргоновой плазме атмосферного давления, находим, что приведенная степень черноты  $\xi$  для данной системы изменяется от 0,11 при  $T_{ms} = 1000$  К до 0,17 при  $T_{ms} = 2500$  К и незначительно зависит от температуры плазмы в диапазоне  $T_p = 5000 \dots 15000$  К (использованные в расчетах зависимости  $n_{m, pe}$  и  $\nu_{m, pe}$  от температуры взяты из работ [16, 17]).

Результаты расчетов  $Q_r$  для рассматриваемой системы представлены на рис. 4. Для сравнения на этом же рисунке приведена зависимость  $Q_c$  и суммарного теплового потока в частицу, имеющую фиксированную температуру поверхности  $T_{ms} = 2000$  К, от температуры невозмущенного потока плазмы  $T_p$ . Как следует из представленных расчетных кривых, при  $T_p > 8000$  К теплообмен излучением вносит более существенный вклад в общий тепловой поток, чем его конвективно-кондуктивная составляющая. Этот эффект особенно заметен при высоких температурах плазмы, поскольку при  $T_p > 14000$  К значения  $Q_c$  несколько снижаются за счет поправочного коэффициента  $\chi_s/\chi$  в выражении для числа Nu (8), тогда как значения  $Q_r$  продолжают возрастать.

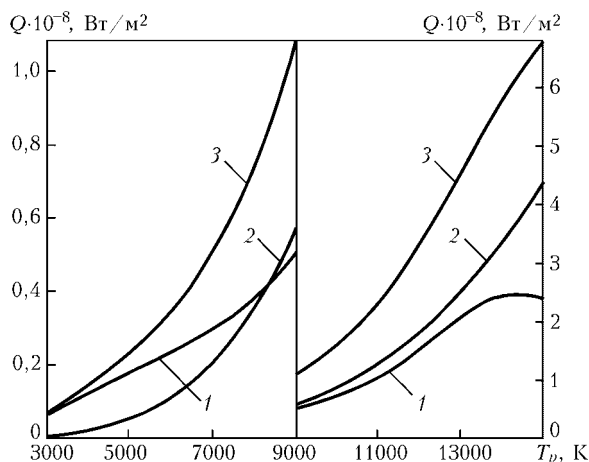


Рис. 4. Влияние радиационного теплообмена на плотность  $Q$  теплового потока из плазмы в алюминиевую частицу радиусом 30 мкм при  $u = 300$  м/с и  $T_{ms} = 2000$  К: 1 —  $Q_c(T_p)$ ; 2 —  $Q_r(T_p)$ ; 3 — их сумма



## Выводы

1. Проведенный численный анализ конвективно-кондуктивной составляющей теплового потока из аргоновой плазмы при атмосферном давлении в обтекаемую ней сферическую частицу дисперсного материала свидетельствует о значительном разбросе расчетных данных, полученных с использованием различных критериальных зависимостей. При больших значениях относительной скорости, а также разницы температур невозмущенного плазменного потока и поверхности частицы наилучшее совпадение с экспериментальными данными дает критериальная зависимость, учитывающая изменение плотности, коэффициентов вязкости и теплопроводности плазмы по толщине теплового пограничного слоя вокруг частицы.

2. При высоких температурах плазмы теплообмен излучением между плазменной струей атмосферного давления и поверхностью напыляемой частицы может играть важную роль в общем энергетическом балансе частицы и его необходимо учитывать при анализе процесса нагрева порошковых материалов в условиях плазменного напыления. В частности, при нагреве алюминиевых частиц потоком аргоновой плазмы, имеющей температуру выше 8000 К, радиационная составляющая теплового потока в частицу оказывается более существенной, чем конвективно-кондуктивная.

1. Донской А. В., Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1979. — 221 с.
2. Гнедовец А. Г., Лохов Ю. Н., Углов А. А. Теплофизические задачи обработки частиц тугоплавких металлов в горячей газе // Физика и химия обраб. материалов. — 1979. — № 6. — С. 36–43.
3. Bourdin E., Fauchais P., Boulos M. Transient heat conduction under plasma conditions // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1983. — 26, № 4. — P. 567–582.

4. Volatilization of metal powders in plasma sprays / A. Vardelle, M. Vardelle, H. Zhang et al. // J. of Thermal Spray Technology. — 2002. — 11, № 2. — P. 244–252.
5. Shimanovich V. D., Smyaglikov I. P., Zolotovskiy A. I. An effect of near-cathode region plasma of an argon arc on metal particles // Progress in plasma processing of materials 2003: Proc. of the 7th European conf. on thermal plasma processes, Strasbourg, June 18–21, 2003. — New York: Begell House Inc., 2003. — P. 257–262.
6. Кутамеладзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
7. Ландау Л. Д., Lifshits E. M. Теоретическая физика. — В 10 т. — Т. 6: Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
8. Бузов И. С. К расчету теплообмена частиц дисперсного материала с плазменными потоками // Физика и химия обраб. материалов. — 1979. — № 4. — С. 42–49.
9. Ranz W. E., Marshall W. R. Evaporation from drops // Chem. Eng. Progr. — 1952. — № 48. — P. 141–146, 173–180.
10. Fiszdon J. K. Melting of powder grains in a plasma fume // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1979. — № 22. — P. 749–761.
11. Физика и техника низкотемпературной плазмы / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб и др. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
12. Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: Fundamentals and applications. — New York; London: Plenum press, 1997. — Vol. 1. — 454 p.
13. Bushma A. I., Krivitsun I. V. Peculiarities of absorption and scattering of different wavelength laser radiation by fine spherical particles // Laser technologies in welding and materials processing: Proc. of Intern. conf., May 19–23, 2003, Katsiveli, Crimea. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003. — P. 103–107.
14. Хур К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы. — М.: Мир, 1976. — 600 с.
15. О влиянии слоистых диэлектрических покрытий на поглощательные свойства ограниченных плазмонподобных сред / В. С. Гвоздецкий, А. Г. Загородний, И. В. Кривцун и др. // Радиотехника и электроника. — 1987. — 32, № 11. — С. 2372–2381.
16. Miller J. C. Optical properties of liquid metals at high temperatures // Phil. Mag. — 1969. — № 20. — P. 1115–1132.
17. Расчет энергетических коэффициентов поглощения и отражения электромагнитного излучения при лазерной сварке / В. С. Гвоздецкий, Г. М. Корчинский, И. В. Кривцун и др. // Автомат. сварка. — 1986. — № 5. — С. 33–37.

Physical processes are described which determine the thermal impact of the plasma jet on dispersed material particles in plasma spraying of coatings. Various criterial dependencies are analyzed that are used for calculation of the convective-conductive component of the heat flow through the surface of a spherical particle in the flow of a low-temperature plasma at atmospheric pressure. A procedure is proposed for calculation of the characteristics of radiation heat exchange of a dense plasma with the metal particle surface. Numerical analysis of the considered components of the heat flow into the particle has been conducted in a broad range of parameters of an undisturbed plasma flow (argon plasma) and temperature of particle surface (aluminium). A significant influence of radiation heat exchange on the resulting heat flow through the surface of the spraying particle is shown.

Поступила в редакцию 28.06.2004



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ С МУНДШТУКОМ ГОРЕЛКИ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБАХ ДУГОВОЙ СВАРКИ

**И. В. ПЕНТЕГОВ**, д-р техн. наук, **О. И. ПЕТРИЕНКО**, **С. В. ПУСТОВОЙТ**, инженеры,  
**В. Н. СИДОРЦ**, канд. техн. наук, **А. В. ЛАВРЕНЮК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны эксперименты по определению падения напряжения в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки. По результатам компьютерной обработки опытных данных предложены эмпирические формулы зависимости контактного падения напряжения от различных параметров сварки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, контактное падение напряжения, контактное сопротивление

В работах [1, 2] описана математическая модель тепловых и электрических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах в системе источник питания–сварочная дуга. В модели используется предполагаемое известным значение падения напряжения  $U_{\text{кон}}$  в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки.

Определению падения напряжения и сопротивления в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки посвящено много работ [3–10], однако большинство из них не позволяют использовать эти данные в разработанной математической модели из-за своих недостатков. Например, в работе [3] значения  $U_{\text{кон}}$  были установлены не экспериментальным путем, а методом экстраполяции зависимостей, полученных опытным путем, на «нулевой» вылет. Согласно данным этой работы, падение напряжения между мундштуком и электродной проволокой при токе 350 А составляет 0,6...0,9 В и незначительно увеличивается с уменьшением диаметра электродной проволоки. Однако из работы [3] не ясно, при какой скорости подачи проволоки зафиксированы эти результаты. Поэтому нельзя получить функциональную зависимость между  $U_{\text{кон}}$  и скоростью подачи проволоки  $v_{\text{п}}$ .

Методика исследования, описанная в работе [4], основана на осциллографировании падения напряжения между мундштуком и скользящим вольфрамовым щупом, перемещаемым по поверхности электрода по направлению к изделию. Щуп в процессе осциллографирования последовательно проходит собственно вылет, «горячий» конец электрода и зону дуги, что дает возможность определить распределение напряжений на этих участках. Методика позволила получить значительное количество осциллограмм, показывающих, что падение напряжения на вылете нелинейно увеличивается по мере приближения к «горячему» концу, на

границе с которым оно резко возрастает. Но эти данные дают лишь косвенную информацию о значениях  $U_{\text{кон}}$ , полученных посредством экстраполяции кривых в начало вылета электродной проволоки.

Измерения  $U_{\text{кон}}$ , проведенные в работах [5, 6], показали, что на уровень  $U_{\text{кон}}$  также влияет кривизна электродной проволоки и форма токоподводящего наконечника. Так, при сварке проволокой Св-08Х20Н9Г7Т диаметром 2 мм значения  $U_{\text{кон}}$  изменяются от 2 до 4 В, а при сварке предварительно выровненной проволокой с цилиндрическим токоподводящим наконечником через 1...2 ч сварочного процесса  $U_{\text{кон}}$  может достигать 10...15 В. Авторы работы [5] утверждают, что при износе наконечника возрастает отклонение значений  $U_{\text{кон}}$  от установленного. Однако они не указывают значения ни скорости подачи электродной проволоки  $v_{\text{п}}$ , ни сварочного тока  $I$ , при которых проводились эксперименты.

Результаты измерений  $U_{\text{кон}}$  в работах [3, 5] расходятся на порядок.

В работе [7] определено сопротивление контакта мундштук–проволока и приведены данные о режимах (скорость подачи, сварочный ток, диаметр проволоки), при которых получены значения контактных сопротивлений, имеющие большой разброс, что делает использование их в математической модели невозможным. Поэтому получение достоверных сведений об уровне падения напряжения в контакте мундштук–проволока, которые можно было бы использовать в математической модели тепловых и электрических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах, является актуальной задачей.

В настоящей работе описываются эксперименты по определению падения напряжения в месте контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки с использованием компьютерных методов обработки полученных опытных данных. Измерения проводились по схеме, приведенной на рис. 1.

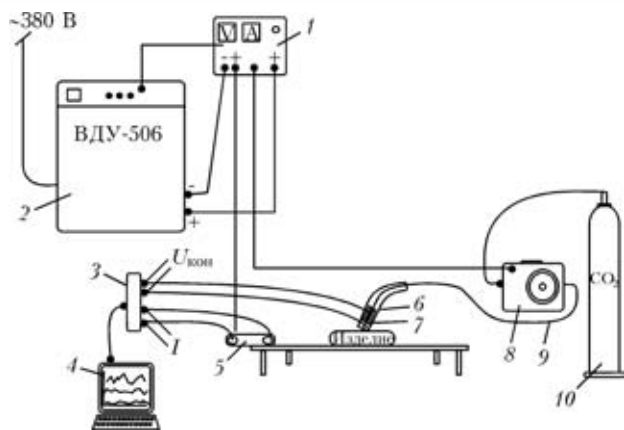


Рис. 1. Схема подключения оборудования и приборов при проведении экспериментов: 1 — пульт управления; 2 — источник питания ВДУ-506; 3 — делитель напряжения и блок гальваноразвязки; 4 — персональный компьютер со встроенным АЦП (L-154); 5 — шунт; 6 — горелка; 7 — мундштук; 8 — подающий механизм; 9 — сварочная проволока; 10 — баллон с углекислым газом

Для эксперимента использовали нерихтованную проволоку Св-08Г2С диаметрами 0,8 (омедненная) и 1,2 мм (неомедненная) при различных значениях скорости подачи сварочной проволоки (обратная полярность) в углекислом газе. Для питания сварочной дуги применяли источник с жесткой внешней характеристикой ВДУ-506. Экспериментальные данные обрабатывали на компьютере со специально встроенной платой L-154 (LCARD, Россия), в которой реализовано аналого-цифровое преобразование (АЦП) входных сигналов. В АЦП было задействовано два канала, на вход которых подавали через блок усиления и гальваноразвязки текущие значения контактного падения напряжения  $U_{кон}$  и сварочного тока  $I$ . Сигнал  $U_{кон}$  поступал на блок гальваноразвязки через делитель напряжения, а сигнал  $I$  снимался с шунта.

Затем экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы «PowerGraph», предназначенной для регистрации, обработки и хранения аналоговых сигналов, записанных с помощью АЦП в цифровом виде. Это позволяет использовать персональный компьютер в качестве обычного ленточного самописца, но с возможностью применения методов компьютерной обработки данных. Частота измерений  $U_{кон}$  и  $I$  составляла 20 кГц. Значения  $R_{кон}$  были получены в результате математической обработки данных  $U_{кон}$  и  $I$ .

Снятие значений контактного падения напряжения производили с помощью вольфрамового щупа, установленного на расстоянии 1 мм от торца мундштука сварочной горелки. Щуп подпружиненно закрепляли в вырезе насадки сварочной горелки специально изготовленным приспособлением (рис. 2) и осуществляли скользящий контакт с проволокой. Второй вывод измерительной цепи припаивали к медному мундштуку.

Фрагменты осциллограмм падения напряжения и тока, а также сопротивления в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки, полученные описанным способом при различных диаметрах проволоки и скоростях подачи проволоки, приведены на рис. 3, 4. Необходимо

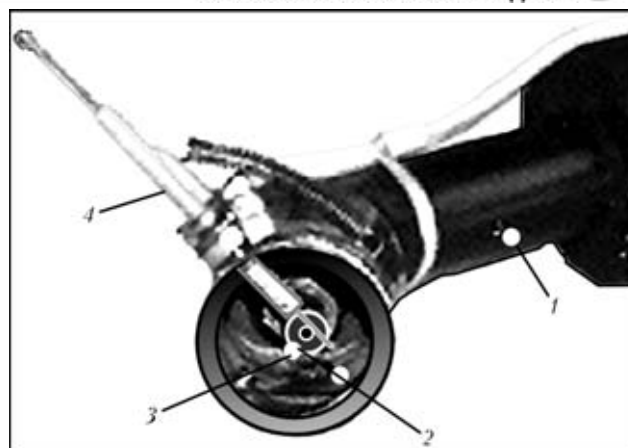


Рис. 2. Внешний вид мундштука сварочной горелки с установленным на нем щупом: 1 — сварочная горелка; 2 — сопло сварочной горелки; 3 — щуп; 4 — мундштук

отметить, что в опытах измеряли чистое контактное падение напряжения плюс падение напряжения на скрытом участке вылета электрода. Разделить эти два напряжения невозможно и в этом нет необходимости, так как для тепловых расчетов нужна именно сумма этих напряжений.

Записанные с помощью программы «PowerGraph» через равные интервалы времени в 0,05 с точечные цифровые массивы значений сварочного тока, контактного падения напряжения и сопротивления позволяют построить вольт-амперные (ВАХ) и ом-амперные характеристики (ОАХ) контакта мундштук–проволока при различных диаметрах проволоки и скоростях подачи проволоки и исследовать характер их изменений в процессе дуговой сварки в инертных газах. Эти точечные зависимости приведены на рис. 5. Здесь показаны области выборочного ряда мгновенных значений  $U_{кон}$  и  $I$  при сварке с короткими замыканиями (КЗ) и без КЗ для электродной проволоки разных диаметров (0,8, 1,2 мм) и различных значений  $v_{п}$ .

Из рассмотрения приведенных точечных массивов можно сделать вывод, что ВАХ контакта не зависит от режима сварки (с КЗ или без КЗ), все точки при одних и тех же токах располагаются в узкой области независимо от режимов. Это объясняется тем, что контакт — малоинерционный объект и его состояние обусловлено значением тока в данный момент времени и не зависит от предыстории процесса. Поэтому ВАХ контакта не зависит не только от режимов, но и от параметров сварочной цепи (индуктивности сварочного дросселя, напряжения источника питания и длины вылета). Прослеживается зависимость ВАХ контакта от диаметра электродной проволоки  $d$  и скорости ее подачи  $v_{п}$ . Параметр  $U_{кон}$  растет при увеличении скорости подачи  $v_{п}$  и уменьшается при возрастании диаметра электродной проволоки  $d$ . При фиксированных  $d$  и  $v_{п}$  среднее значение  $U_{кон}$  определяется только мгновенным значением сварочного тока  $I$ . Напряжение  $U_{кон}$  плавно возрастает с повышением тока через контакт и для неизношенного медного мундштука в рабочем интервале токов находится в диапазоне 0,2... 1,5 В. Омеднение про-



волокни или его отсутствие практически не сказывается на  $U_{\text{кон}}$ .

Разброс значений  $U_{\text{кон}}$  вызван стохастическими изменениями как контактного сопротивления, так и длины «скрытого» участка вылета электрода, обусловленных блужданиями точки контакта.

Для того чтобы использовать массивы полученных данных в математической модели, необходимо сделать аппроксимации ВАХ контакта мундштук-проволока. В данном случае нами использована степенная форма аппроксимации зависимостей математического ожидания  $U_{\text{кон}}$  от тока, скорости подачи проволоки и диаметра проволоки, которая при неизношенном медном мундштуке имеет вид

$$U_{\text{кон}}(d, v_{\text{п}}, I) = \left[ 2,55 \left( \frac{I d_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}} d} \right)^{0,2} - 1,78 \right] \left( \frac{v_{\text{п}}}{v_{\text{баз}}} \right)^{0,2} \text{ [В]}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{баз}}, d_{\text{баз}}, v_{\text{баз}}$  — базовые значения соответственно сварочного тока, диаметра электрода и скорости подачи, которые подбирались как опорные значения при показателе степени, равном 0,2:

$$I_{\text{баз}} = 180 \text{ А}, d_{\text{баз}} = 1 \text{ мм}, v_{\text{баз}} = 0,035 \text{ м/с}.$$

Формула (1) может использоваться для областей изменения параметров, при которых  $U_{\text{кон}} > 0$ .

Полученные математические зависимости  $U_{\text{кон}}$  от  $I$  при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах могут служить элементами математической модели тепловых процессов в вылете электрода, частично описанной в работах [1, 2].

Возможное максимальное отклонение экспериментальных данных  $\Delta U_{\text{кон}}$  (максимальный разброс значений  $U_{\text{кон}}$ ) от средних значений  $U_{\text{кон}}$ , рассчитанных по формуле (1), для всего допустимого диапазона изменения сварочного тока  $I$  при неизношенном медном мундштуке не превышает

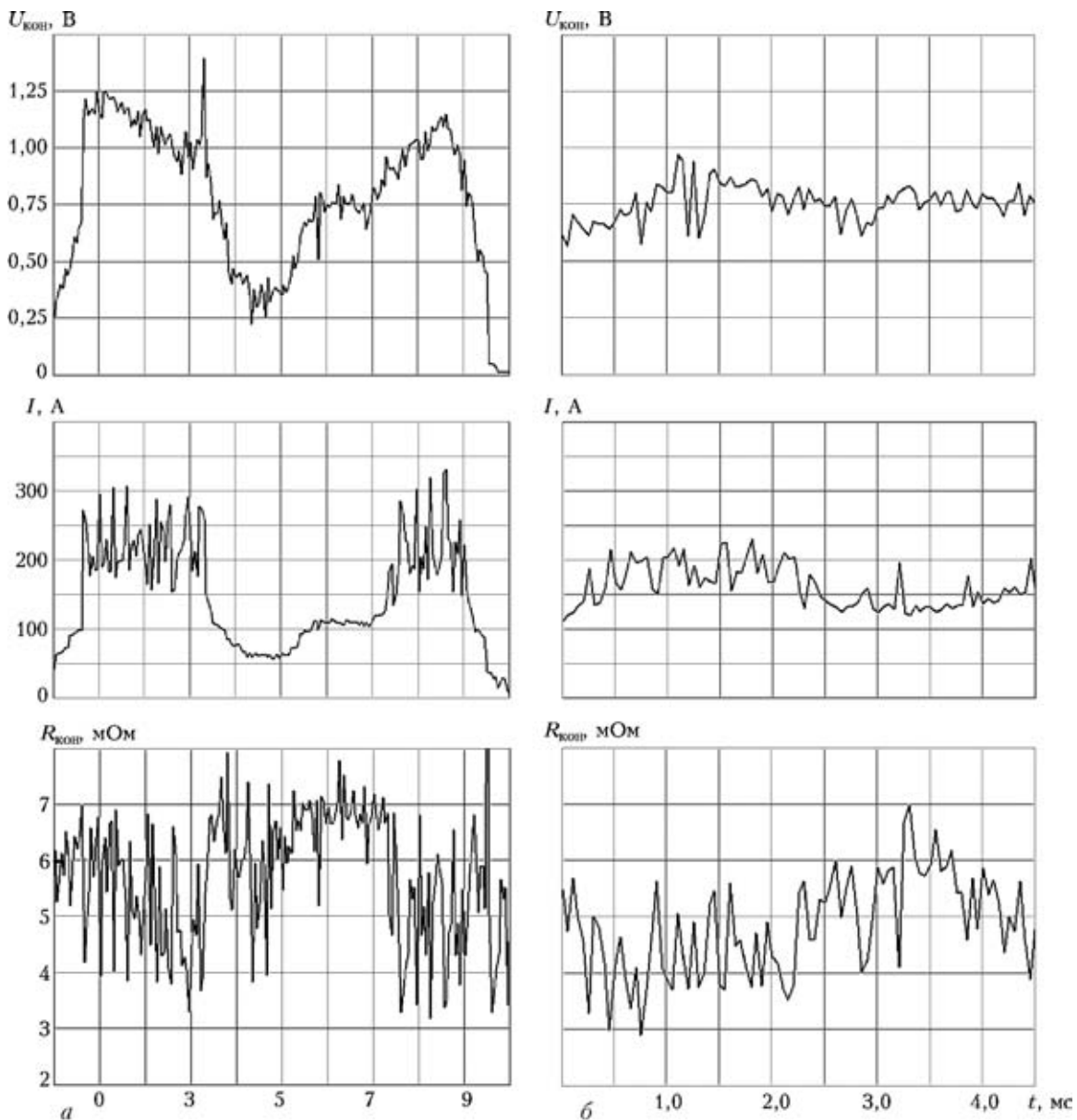


Рис. 3. Фрагменты обрабатываемых осциллограмм при сварке с КЗ (а) и без КЗ (б) при  $d = 0,8 \text{ мм}, v_{\text{п}} = 0,053 \text{ м/с}$

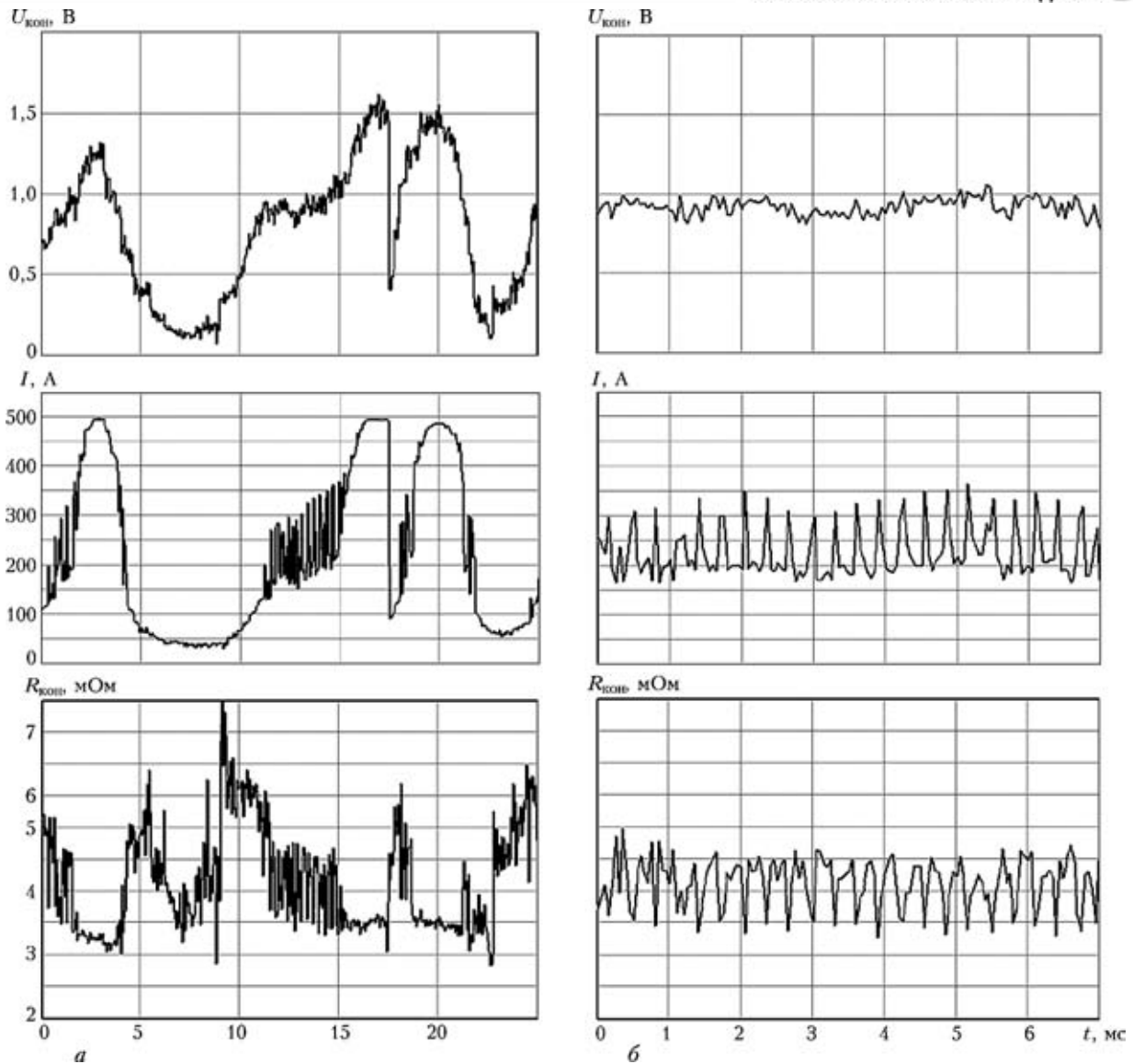


Рис. 4. Фрагменты обрабатываемых осциллограмм при сварке с КЗ (а) и без КЗ (б) при  $d = 1,2$  мм,  $v_{п} = 0,085$  м/с

$$\Delta U_{кон} = (d, v_{п}, I) = \pm 0,33 \left( \frac{I d_{баз} v_{п}}{I_{баз} d v_{баз}} \right)^{0,2} \text{ [В]}. \quad (2)$$

Формула справедлива при  $U_{кон} > \Delta U_{кон}$ .  
 На рис. 5 приведены также кривые аппроксимации усредненной зависимости экспериментальных данных  $U_{кон}$  от  $I$  по формуле (1) при сварке с КЗ и без КЗ. Как следует из рисунка, аппроксимация ВАХ контакта правильно отражает все особенности точечных массивов данных и ею можно пользоваться для оценки среднего значения падения напряжения в области контакта мундштук–проволока.

Точечные массивы экспериментальных данных имеют свои особенности при малых и больших токах. При токах, меньших 30...40 А, как для омедненной, так и для неомедненной проволоки наблюдается стохастически повторяющееся снижение  $U_{кон}$  до 0,01...0,04 В, которое может быть объяснено тем, что при малых токах на проволоке образуется устойчивая медная прослойка из материала мундштука, а сопротивление контакта

медь–медь намного меньше сопротивления контакта медь–сталь. Этот вопрос требует самостоятельного исследования.

При больших плотностях тока в электродной проволоке, превышающих 400 А/мм<sup>2</sup>, характер контакта становится искровым, что приводит к резкому увеличению уровня  $U_{кон}$  (рис. 5, е). Эти режимы желательно не допускать, поскольку они сопровождаются повышенным износом мундштука и возникновением тепловых волн, движущихся вместе с вылетом и приводящих к разрушению устойчивости сварочного процесса.

Все это накладывает ограничение сверху на выбор допустимого тока сварки, причем, чем меньше диаметр электродной проволоки, тем меньше допустимый сварочный ток. Так, например, при  $d = 0,8$  мм и  $v_{п} = 0,066$  м/с критическая плотность тока достигается при токе 180 А, а при  $d = 1,2$  мм она не достигается даже при токе 400 А независимо от скорости подачи.

Граница возникновения искрового контакта смещается в сторону меньших плотностей тока в проволоке при износе мундштука, при этом  $U_{кон}$  может

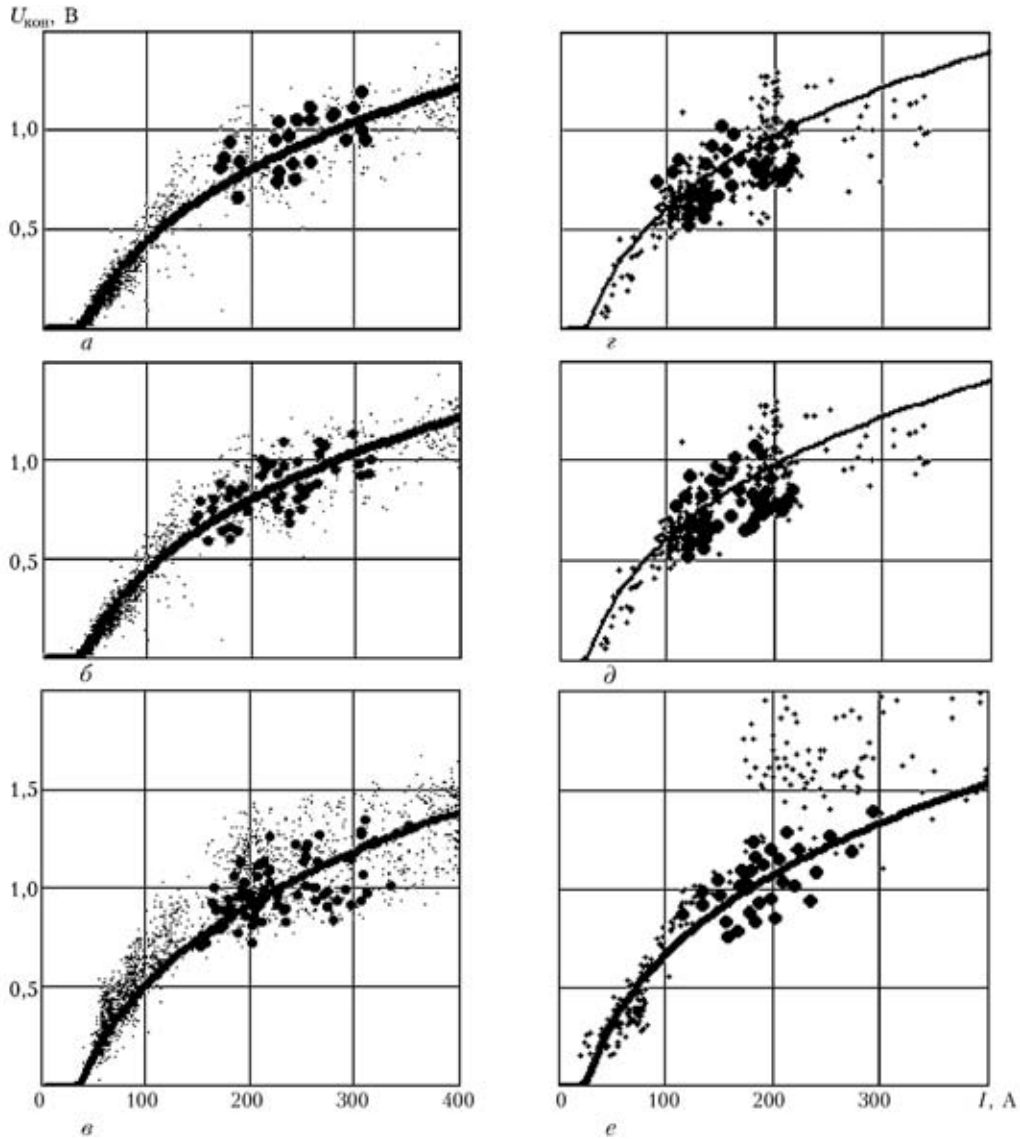


Рис. 5. Массивы экспериментальных значений  $U_{кон}$  и  $I$  при сварке с КЗ (плюсы) и без КЗ (точки) и аппроксимации ВАХ (кривая):  $a - d = 1,2$  мм;  $v_{п} = 0,055$  м/с;  $b - d = 0,8$  мм;  $v_{п} = 0,041$  м/с;  $e - d = 1,2$  мм;  $v_{п} = 0,085$  м/с;  $z - d = 0,8$  мм;  $v_{п} = 0,053$  м/с;  $д - d = 1,2$  мм;  $v_{п} = 0,108$  м/с;  $e - d = 0,8$  мм;  $v_{п} = 0,066$  м/с

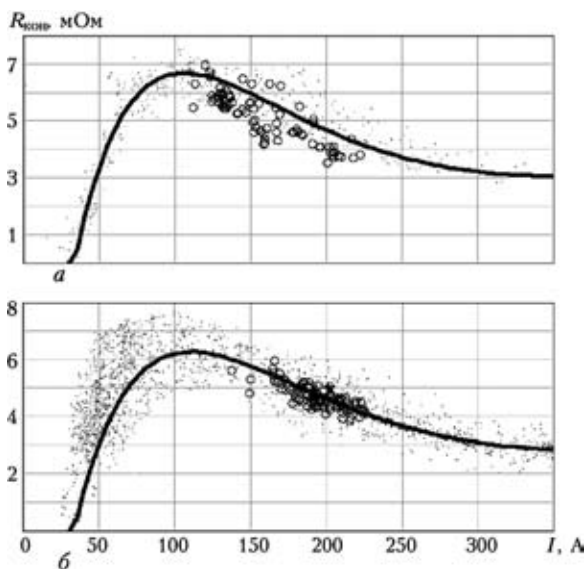


Рис. 6. Массивы экспериментальных значений  $R_{кон}$  и  $I$  при сварке с КЗ (точки) и без КЗ (кружочки) и типичная усредненная ОАХ (кривая) контакта при  $d = 0,8$  (а) и  $1,2$  (б) мм

резко возрастать, достигая значений до 6... 10 В. Поэтому при работе с изношенным мундштуком качественные сварные соединения получить невозможно.

На рис. 6 приведены точечный массив  $R_{кон}$  и типичная усредненная ОАХ контакта, определяемая как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат к текущей точке ВАХ и построенной с использованием выражения (1), по формуле

$$R_{кон}(d, v_{п}, I) = \frac{U_{кон}(d, v_{п}, I)}{I} [\text{Ом}]. \quad (3)$$

Максимум этой кривой определяется точкой касания луча, проведенного из начала координат касательно к ВАХ контакта.

### Выводы

1. Проведены эксперименты по определению падения напряжения в месте контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки с ис-





пользованием компьютерных методов обработки опытных данных. Получены массивы экспериментальных значений падения напряжения, тока и сопротивления в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки.

2. Построены ВАХ и ОАХ контакта мундштук-проволока при различных диаметрах проволоки и скоростях подачи. Установлено, что ВАХ контакта не зависит от режимов сварки (с КЗ или без КЗ) и параметров сварочной цепи.

3. Выявлена зависимость ВАХ контакта от диаметра электродной проволоки  $d$  и скорости подачи  $v_{II}$ .

4. Получены аппроксимации усредненной зависимости экспериментальных данных  $U_{кон}$  от  $I$  при сварке с КЗ и без КЗ. Установлено, что аппроксимация ВАХ контакта отражает все особенности точечных массивов данных и ею можно пользоваться для оценки среднего значения падения напряжения в области контакта мундштук-проволока.

5. Даны рекомендации по выбору допустимых режимов сварки.

1. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом не-

Experiments are described on determination of voltage drop in the area of electrode wire contact with the welding torch nozzle. Results of computer processing of experimental data were the basis to suggest empirical formulas of contact voltage drop dependence on different welding parameters.

- линейности теплофизических параметров // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 30–33.
2. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Расчет распределения температуры по длине вылета электрода с учетом тепла, поступающего от капли // Там же. — 2003. — № 7. — С. 23–28.
3. *Кошкарев Б. Т., Михайлов А. Н., Будник Н. М.* Влияние вылета на процесс плавления электрода при сварке в  $CO_2$  // Свароч. пр-во. — 1971. — № 11. — С. 30–32.
4. *Кутенов Ю. Н.* Анализ и разработка систем автоматического регулирования вылета электрода при сварке в углекислом газе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1970. — 16 с.
5. *Бригидин В. Я.* О работе токоподводящих наконечников при дуговой сварке // Свароч. пр-во. — 1979. — № 8. — С. 20–21.
6. *Бригидин В. Я., Копотон Д. А.* Распределение тока в контактной паре электродная проволока – наконечник сварочного автомата или полуавтомата // Автомат. сварка. — 1977. — № 6. — С. 21–24.
7. *Чубуков А. А.* Сопротивление в контакте наконечник – сварочная проволока при сварке в углекислом газе // Свароч. пр-во. — 1980. — № 12. — С. 31–32.
8. *Вахалин В. А.* К вопросу о передаче скользким контактом // Там же. — 1971. — № 1. — С. 2–3.
9. *Zwickert H.* Untersuchung der Kontaktverhältnisse bei der Stromübertragung auf den Schweißdraht // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität «Otto von Guericke». — Magdeburg, 1987. — Heft 4. — S. 96–102.
10. *Berger H., Pfeiffer G.* Kontaktduesen beim MAG-Schweißen // ZIS-Mitt. — 1986. — 28, № 6. — S. 641–643.

Поступила в редакцию 29.09.2004,  
в окончательном варианте 17.11.2004



## РЫНОК МЕТИЗОВ СНГ-2005

### I Ежегодная международная конференция

29 июня–1 июля 2005 г.

г. Ялта, АР Крым, Украина

**Организаторы:** Центр Держзовнишинформ и объединение «Укрметиз»

**Цель проведения:** Конференция проводится с целью анализа и обобщения опыта производства и торговли метизами, а также прогнозирования конъюнктуры рынка метизов на ближайшую перспективу. Предусматривается обсуждение проблем реализации инноваций в рамках малого, среднего и крупного бизнеса. Кроме того, Вам предоставляется прекрасная возможность совместить деловую поездку с гостеприимной атмосферой крымского курорта Южного берега Крыма.

#### Тематика конференции:

- ✓ новое в производстве метизов (сертификация продукции, гармонизация нормативной базы, технологии, оборудование, защитные покрытия, новая продукция);
- ✓ сырьевые материалы для производства метизов (качество, объемы, цены);
- ✓ торговля метизами (внутренний и внешний рынки, прогноз конъюнктуры, торговые ограничения, конкуренция, потребление, ценовая политика);
- ✓ инновации и управление метизным бизнесом (консолидация, импортозамещение, государство и инновации, проблемы кредитования, экспертиза инноваций);
- ✓ презентации фирмами оборудования и технологий для производства метизов.

Контактное лицо: Гнатуш Виталий Аполлонович  
тел. +38(044) 246-41-09; 246-43-67; 482-05-56  
факс: 246-41-09; 246-43-67; 482-05-56  
E-mail: gnat@dze.mfert.gov.ua  
www.eximbase.com

ул. Воровского 22, г. Киев, ГСП-601, 01601, Украина ООО «Экономедиа»



## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СЕРДЕЧНИКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ И ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ

**В. Н. ШЛЕПАКОВ**, д-р техн. наук, **А. С. КОТЕЛЬЧУК**, **С. М. НАУМЕЙКО**, кандидаты техн. наук,  
**А. В. БИЛИНЕЦ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследований процесса дуговой сварки порошковыми проволоками типа металл-кор в защитных газах. На основе анализа данных мониторинга электрических сигналов установлено влияние минеральных составляющих сердечника порошковой проволоки и состава защитного газа на стабильность горения дуги и характер переноса металла.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, порошковая проволока с металлическим сердечником, защитный газ, электрические сигналы, статистическая обработка, исследования стабильности процесса

Особенности горения дуги, плавления и переноса металла при сварке в защитных газах проволоками сплошного сечения и порошковыми проволоками достаточно подробно освещены в работах [1–3]. В них отмечено, что стабильность процесса сварки и характер переноса электродного металла существенно зависят от химического состава проволоки, режима сварки, полярности тока и применяемого защитного газа [1, 2]. В последнее десятилетие получила распространение сварка в защитных газах проволокой с металлическим сердечником [3] с малой (до 2 %) массовой долей неметаллических составляющих. Однако особенности процесса дуговой сварки проволоками этого типа исследованы недостаточно.

Для оценки влияния малых добавок неметаллических минеральных компонентов в сердечнике на технологические свойства исследован процесс сварки в углекислом газе и смеси 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub> порошковыми проволоками с металлическим сердечником различного состава. В качестве базовой взята порошковая проволока указанного типа диаметром 1,2 мм, в сердечнике которой отсутствуют минеральные составляющие. Исследовали влияние добавок в сердечнике проволоки таких минеральных компонентов, как оксид титана, фториды щелочных и щелочноземельных металлов. Массовая доля минеральной составляющей проволоки сердечника равнялась 0,6 % для четырех исследованных составов: рутила (TiO<sub>2</sub>), смесь рутила и флюорита (TiO<sub>2</sub>:CaF<sub>2</sub> — 3:1), смесь рутила и гексафторсиликата натрия (соотношение компонентов TiO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> — 3:1) и смесь рутила, гексафторсиликата натрия и фторида цезия (TiO<sub>2</sub> + Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> + CsF — 6:2:1).

Сварку выполняли на постоянном токе (обратная полярность) с использованием механизма подачи проволоки с максимальными отклонениями скорости ±1,5 % и источника питания сварочной

дуги ВС-500 с жесткой внешней характеристикой. Состав защитного газа (углекислый газ и смесь 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>) по содержанию примесей удовлетворял требованиям существующих стандартов. При выполнении опытных сварок напряжение на дуге составляло  $U_d = 24...26$  В, сварочный ток —  $I_{св} = 260...290$  А, расход защитного газа — 18 л/мин.

Основные параметры процесса дуговой сварки измеряли с использованием системы регистрации и анализа электрических сигналов — анализатора «Ганновер АН-ХП» [4, 5]. В процессе измерений определяли плотность распределения вероятности напряжения на дуге и сварочного тока, а также частоту коротких замыканий и средневзвешенное время горения дуги. Частота съема данных составляла  $5 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>, а продолжительность непрерывной регистрации параметров при опытных сварках во всех случаях — 2 с. Результаты измерений обрабатывали с помощью методов математической статистики [6].

Для анализа результатов брали вычисленные средние значения напряжения на дуге и сварочного тока вместе с их стандартными отклонениями и коэффициентами вариации. По этим данным строили кривые плотности вероятности и получали временные характеристики (в частности, длительность коротких замыканий, средневзвешенное время горения дуги). Результаты статистической обработки параметров дуговой сварки (сварочного тока  $I_{св}$ , напряжения на дуге  $U_d$  и длительности коротких замыканий  $\tau_{к.з}$ ) порошковыми проволоками с металлическим сердечником, полученные с помощью анализатора «Ганновер АН-ХП», приведены в таблице и на рис. 1–5.

Сопоставление данных, полученных при сварке в углекислом газе и смеси 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>, показало, что характер плавления и переноса электродного металла существенно изменяется независимо от состава минеральной добавки в сердечнике порошковой проволоки. Из таблицы и рис. 1–5 видно, что замена углекислого газа на его смесь с аргонем приводит к уменьшению средней длительности коротких замыканий — от 0,4...11,0 мс до практически полного их исчезно-



Статистические характеристики процесса сварки порошковыми проволоками с металлическим сердечником в защитных газах на различных режимах

Минеральная составляющая сердечника	Защитная среда	$U_{д}^{ср}$ , В	$S_U$ , В	$K_U$ , %	$I_{св}^{ср}$ , А	$S_I$ , А	$K_I$ , %	$\tau^{сум}$ , мс	$\tau^{ср}$ , мкс	$K_{\tau}$
Нет	CO <sub>2</sub>	24,8	1,8	0,07	268,2	39,6	0,15	0,8	400	1,24
		24,7	1,9	0,08	272,5	43,2	0,16	0,4	100	0,58
	80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	24,9	0,7	0,03	261,7	15,8	0,06	0	0	∞
TiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	24,9	2,2	0,09	285,0	45,0	0,16	2,0	177,3	1,04
		25,4	2,1	0,08	270,6	43,0	0,16	0,6	183,3	0,31
	80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	24,8	0,7	0,03	275,4	16,8	0,06	0	0	∞
TiO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	25,0	2,4	0,10	276,9	40,9	0,15	11,0	423,1	1,73
	80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	25,4	0,7	0,03	295,6	18,9	0,06	0	0	∞
TiO <sub>2</sub> + CaF <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	24,4	1,5	0,06	293,3	25,6	0,09	0	0	∞
		24,8	1,5	0,06	277,9	30,2	0,11	0	0	∞
	80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	24,2	0,5	0,02	231,0	21,5	0,09	0	0	∞
TiO <sub>2</sub> + CaF <sub>2</sub> + CsF	CO <sub>2</sub>	25,1	1,6	0,06	301,3	31,8	0,11	2,1	210	1,29
		24,9	1,1	0,07	266,8	22,0	0,08	0	0	∞
	80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	24,6	0,5	0,02	278,2	15,0	0,05	0	0	∞

Примечание.  $U_{д}^{ср}$ ,  $I_{св}^{ср}$ ,  $\tau^{ср}$  — средние значения соответственно напряжения на дуге, сварочного тока и длительности коротких замыканий;  $S_U$ ,  $S_I$  — стандартные отклонения значений соответственно напряжения на дуге и сварочного тока;  $\tau^{сум}$  — суммарная продолжительность коротких замыканий;  $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_{\tau}$  — коэффициенты вариации соответственно напряжения на дуге, сварочного тока и длительности коротких замыканий; для сварки в углекислом газе приведены два типичных набора параметров режима, поскольку при данном способе сварки процесс менее стабилен, чем при сварке в смеси 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>.

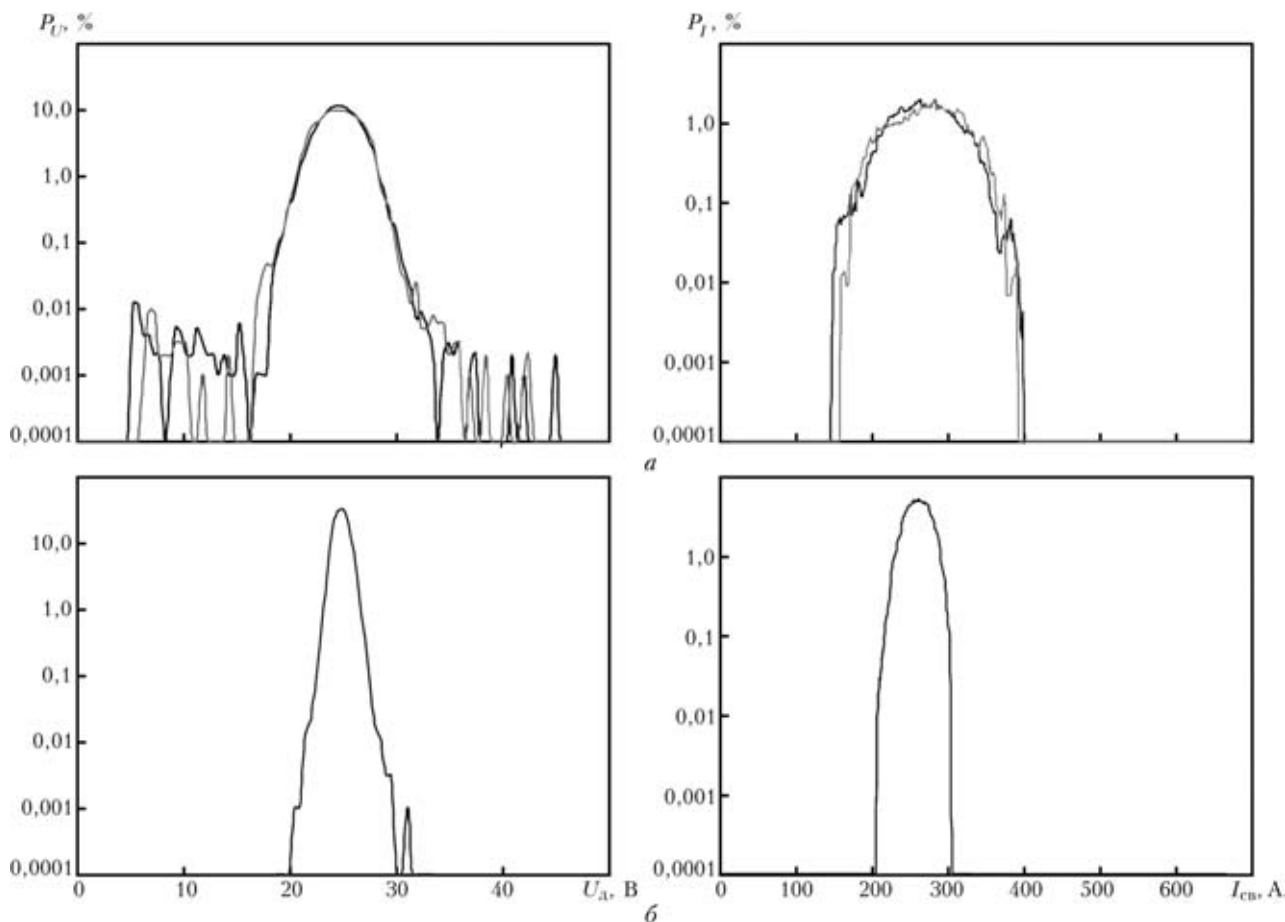


Рис. 1. Кривые распределения плотности вероятности напряжения  $P_U$  и сварочного тока  $P_I$  при дуговой сварке порошковой проволокой с металлическим сердечником, не содержащим минеральных компонентов. Здесь и на рис. 2-5: а — CO<sub>2</sub>; б — смесь 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>; две кривые — результаты двух измерений

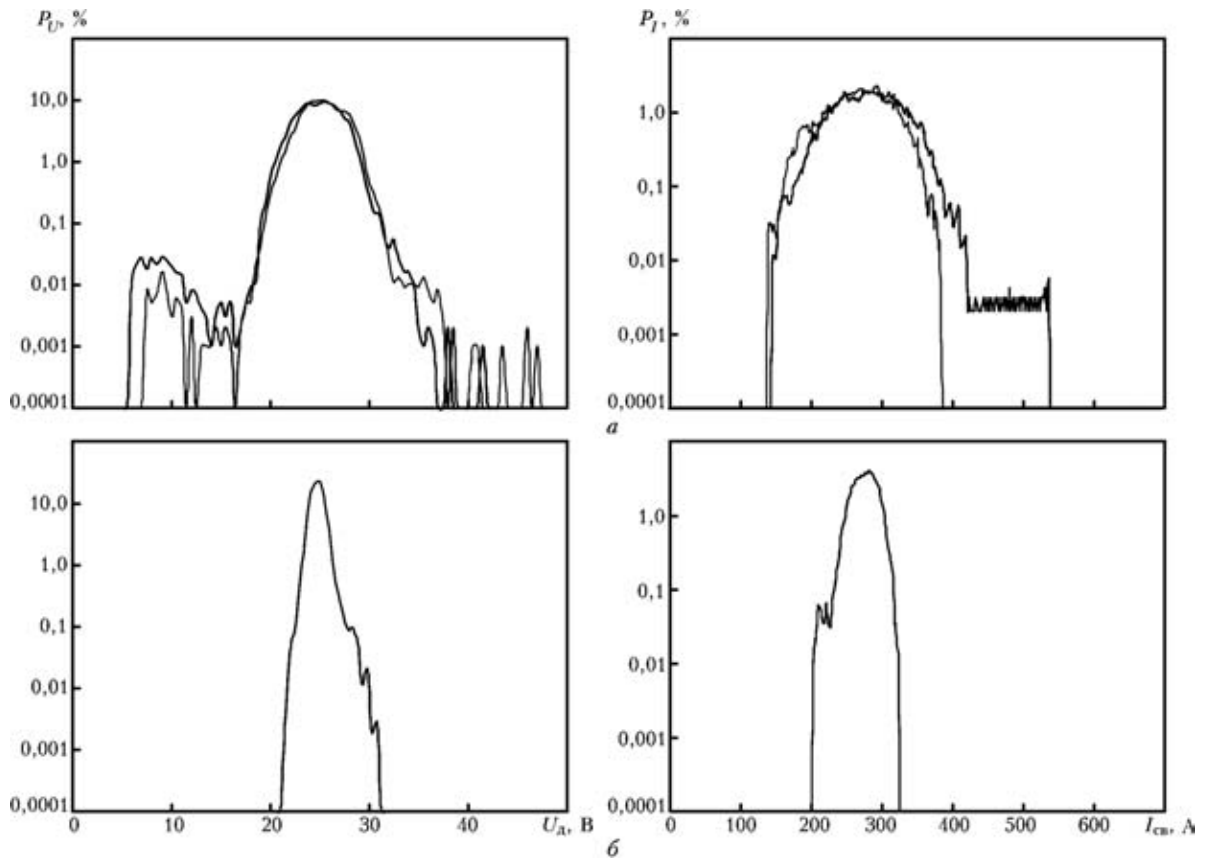


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для проволоки, содержащей рутил

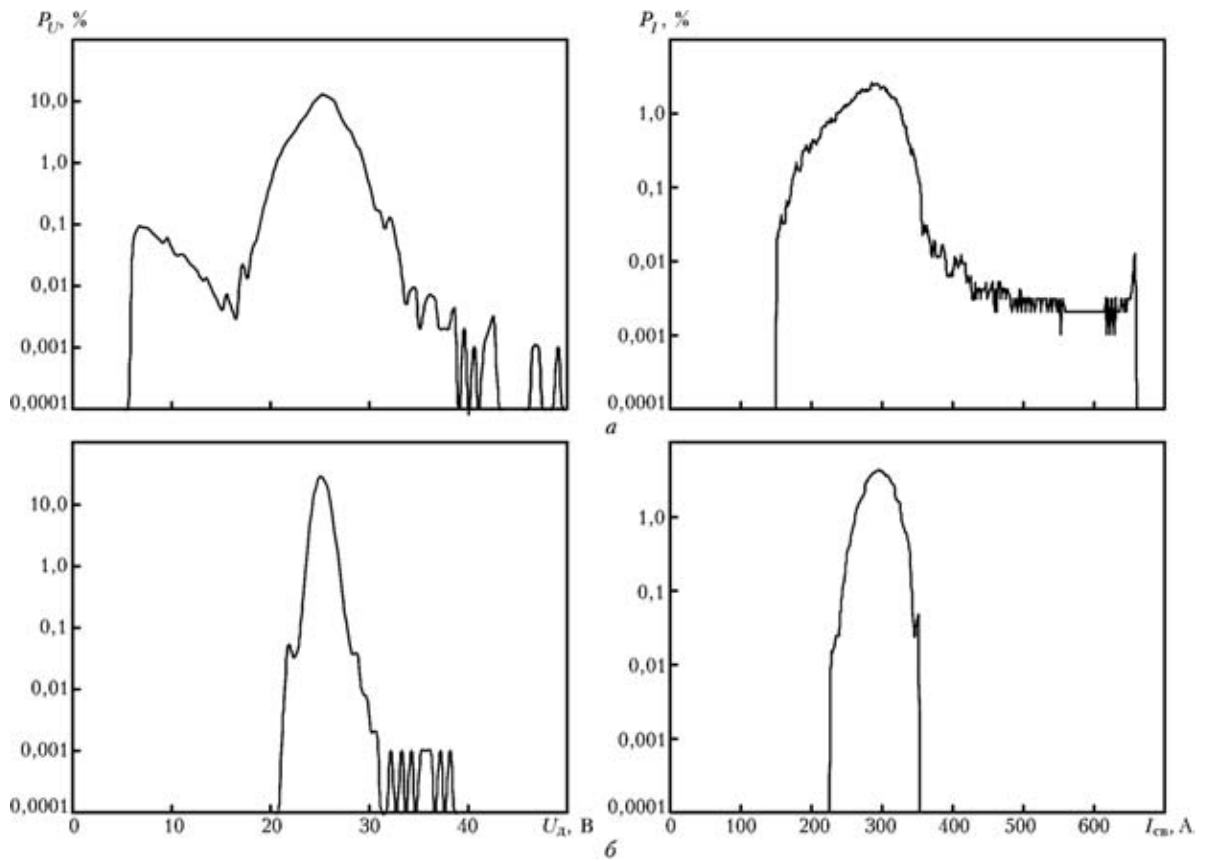


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для проволоки, содержащей смесь рутила и гексафторсилката натрия

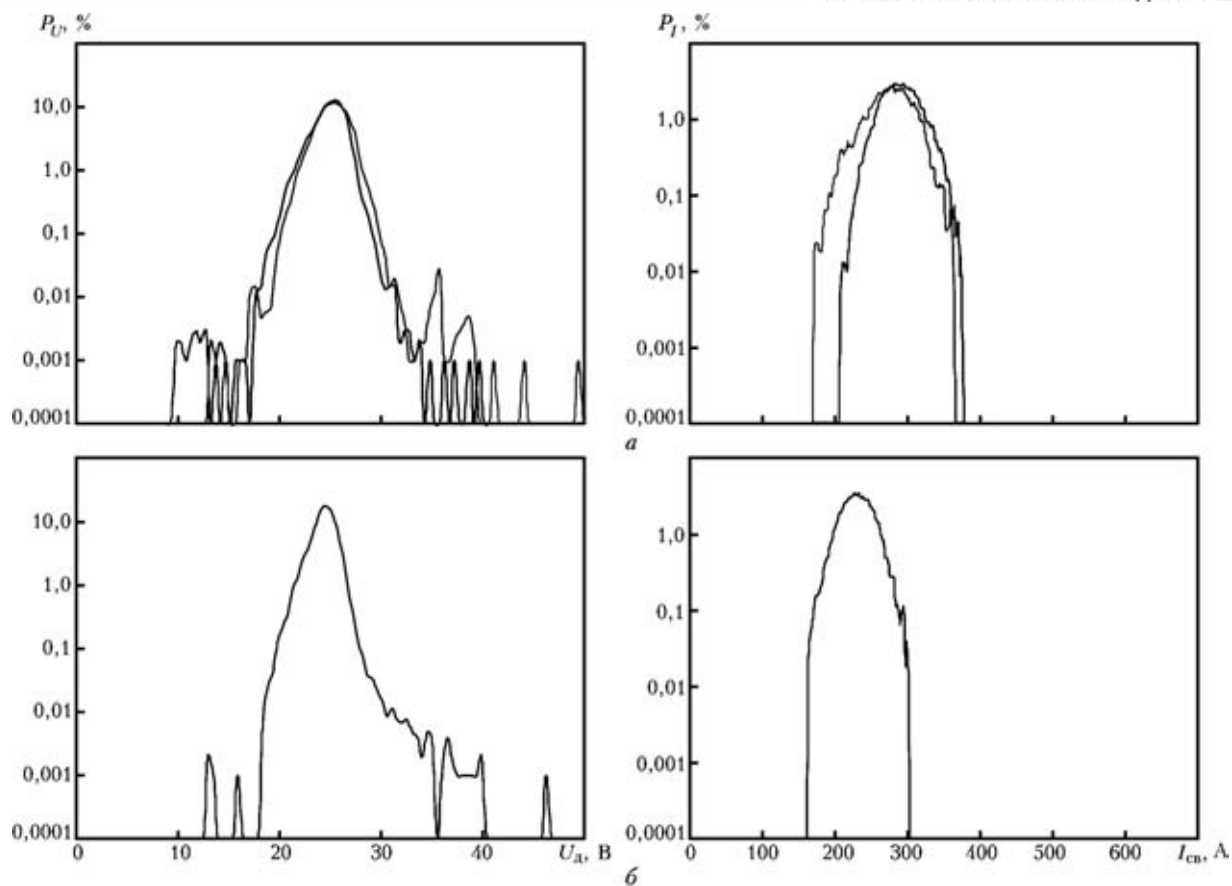


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, но для проволоки, содержащей смесь рутила и флюорита

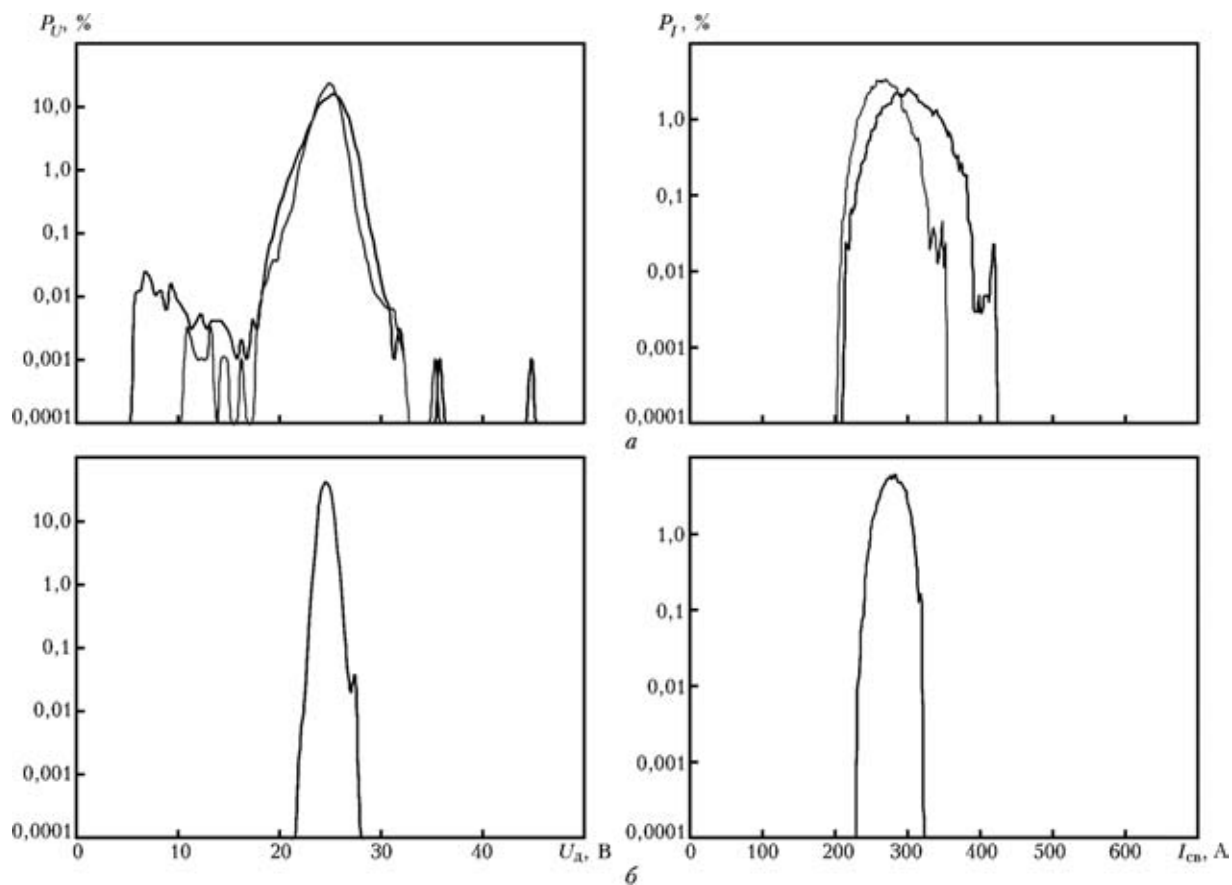


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но для проволоки, содержащей смесь рутила, гексафторсиликата натрия и фторида цезия



вения. Имеет место также изменение характера переноса электродного металла от мелкокапельного к струйному. При этом резко снижается разбрызгивание металла, а амплитуды флюктуаций сварочного тока и напряжения уменьшаются. Стандартные отклонения напряжения уменьшаются с 1,1...2,4 (при сварке в углекислом газе) до 0,5...0,7 В (при использовании смеси аргона с углекислым газом), а сварочного тока снижаются в 2...3 раза. Получить струйный перенос электродного металла при экспериментальной сварке в чистом углекислом газе проволоками исследуемого типа практически не удалось.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что введение в сердечник порошковой проволоки оксида титана (рутила) влияет на стабильность процесса сварки незначительно, а небольшая добавка минеральных составляющих, содержащих соединения фтора, оказывает значительное влияние на стабильность процесса сварки. Однако даже при малом (приблизительно до 0,3 мас. %) содержании фтористых соединений в сердечнике порошковой проволоки стабильность процесса сварки зависит от природы этих соединений. Об этом свидетельствуют изменения общего количества коротких замыканий и амплитуды флюктуаций сварочного тока и напряжения на дуге. Так, при сварке в смеси аргона и углекислого газа при введении в сердечник флюорита наблюдается струйный перенос электродного металла, в то время как добавка гексафторсилката натрия вызывает появление единичных коротких замыканий (см. таблицу и рис. 3, 4). Интенсивное выделение газа из сердечника порошковой проволоки при термической деструкции гексафторсилката натрия обуславливает неравномерность переноса электродного металла. Введение в сердечник проволоки смеси рутила с флюоритом в исследованных массовых долях приводит к некоторой стабилизации процесса сварки и переходу от капельного к струйному переносу электродного металла при сварке в углекислом газе (рис. 4). Наличие флюорита оказывает благоприятное действие на плавление оксида титана и устраняет неравномерность плавления проволоки.

Введение небольшого количества ионизирующего компонента (фторида цезия) способствует стабилизации процесса сварки. Использование смеси аргона с углекислым газом независимо от состава минеральных составляющих сердечника порошковой проволоки оказывает стабилизирующее влия-

ние на процесс ее плавления и обуславливает переход от мелкокапельного переноса электродного металла к струйному.

## Выводы

1. Исследования процесса сварки опытной порошковой проволокой с металлическим сердечником с использованием в качестве защитной среды углекислого газа и его смеси с аргоном показали, что при массовой доле минеральных составляющих в проволоке менее 2 % процесс сварки в смеси 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub> отличается стабильностью плавления и наличием перехода от мелкокапельного переноса электродного металла к струйному без коротких замыканий.

2. При дуговой сварке процесс плавления проволоки, содержащих в качестве минеральной составляющей сердечника термические нестабильные фториды, характеризуется меньшей стабильностью и увеличением разбрызгивания металла. Компоненты оксидного типа (рутил) в композиции с нелетучими фторидами (в исследованном интервале их содержания в сердечнике проволоки) стабилизируют процесс сварки в углекислом газе.

3. Результаты исследований стабильности горения дуги при сварке порошковыми проволоками с металлическим сердечником позволили определить состав минеральной составляющей сердечника, обеспечивающий высокие показатели стабильности процесса сварки и снижение потерь электродного металла при сварке в защитных газах.

1. Дятлов В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке // Новые проблемы сварочной техники. — Киев: Техніка, 1964. — С. 167–182.
2. *Металлургия* дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горниенко, С. С. Милоченко и др. — Киев: Наук. думка, 1990. — 221 с.
3. Билюец А. В. Порошковые проволоки с металлическим сердечником для механизированной сварки в среде защитных газов // Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество», г. Днепропетровск, 1–4 июля 2004 г.: Сб. докл. — Днепропетровск, 2004. — С. 135–139.
4. Blakeley P. J., Hass B. A new approach to arc weld monitoring // *Welding Rev. Intern.* — 1991. — August. — P. 157–160.
5. Rehfeldt D., Schmitz Th., Behrens S. M. Report on the use of quality monitoring systems. — S. l., [1995]. — 27 p. — (Intern. Inst. of Welding; IIW-Doc. XII-1420–95).
6. Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Сунурин С. А. Идентификация состава порошковых проволок по электрическим сигналам дуговой сварки // *Автомат. сварка.* — 1999. — № 8. — С. 37–42.

The paper presents the results of studying the process of gas-shielded arc welding with flux-cored wires of metal-core type. The influence of mineral components of the flux-cored wire core and shielding gas composition on arcing stability and nature of metal transfer has been established, proceeding from analysis of the data of monitoring electrical signals.

Поступила в редакцию 02.08.2004,  
в окончательном варианте 15.02.2005



## ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ

**П. П. ШЕЙКО**, канд. техн. наук, **А. М. ЖЕРНОСЕКОВ**, инж., **А. В. ЛОЗОВСКАЯ**, канд. техн. наук,  
**Ю. О. ШИМАНОВСКИЙ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально установлена эффективность применения двухканальной системы автоматической стабилизации процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСПЭ) алюминиевых сплавов в условиях действия возмущающих факторов. Показано, что механические свойства стыковых сварных соединений сплава АМг6, полученных способом ИДСПЭ, при увеличении вылета электродной проволоки и снижении напряжения питающей сети ухудшаются. Использование двухканальной системы автоматической стабилизации процесса ИДСПЭ позволяет обеспечить механические свойства стыковых сварных соединений на уровне свойств, получаемых при сварке на оптимальных режимах без возмущений.

*Ключевые слова:* импульсно-дуговая сварка, плавящийся электрод, алюминиевые сплавы, автоматическая стабилизация, двухканальная система, возмущающие факторы, среднее значение сварочного тока, среднее значение напряжения на дуге, геометрические размеры швов, дефекты, механические свойства

Одним из прогрессивных способов сварки алюминиевых сплавов является импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (ИДСПЭ). В отличие от сварки неплавящимся электродом способ ИДСПЭ позволяет решать многие проблемы, связанные с повышением качества сварных соединений (уменьшение количества и размеров оксидных включений и пор, увеличение производительности процесса сварки, снижение сварочных деформаций и др.) [1–4]. При сварке неизбежно возникают отклонения параметров режимов от номинальных, что обусловлено действием таких возмущающих факторов, как изменение скорости подачи и вылета электродной проволоки, зазоров и депланаций свариваемых кромок, колебаний напряжения питающей сети, сварка по прихваткам и др. Указанные факторы приводят к изменению геометрических параметров швов, появлению различных дефектов, непроваров и несплавлений, а также снижению механических свойств сварных соединений.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны двухканальные системы автоматической стабилизации (САС) основных энергетических параметров режима ИДСПЭ — средних значений как сварочного тока  $I_{св.ср}$ , так и напряжения на дуге  $U_{д.ср}$  [5, 6].

Целью настоящей работы является оценка влияния разработанных САС процесса ИДСПЭ на качество сварных соединений алюминиевых сплавов.

Проведена оценка влияния основных возмущающих факторов — изменения вылета электродной проволоки и колебания напряжения питающей сети — на качество сварки соединений пластин из сплава АМг6 (ГОСТ 4784–74). Эксперименты про-

водили с использованием сварочной головки типа ГСУ-7 с ее системой управления БАРС-2В, импульсного источника питания типа И-169, созданного в ИЭС им. Е. О. Патона [7], разработанной двухканальной САС:  $I_{св.ср}$  (с воздействием на параметры импульсов источника питания) и  $U_{д.ср}$  (с воздействием на скорость подачи сварочной проволоки).

Определяли влияние  $I_{св.ср}$  и  $U_{д.ср}$  на геометрические параметры швов, наплавленных на пластины из сплава АМг6 толщиной 16 мм проволокой СвАМг6 (ГОСТ 7871–75) диаметром 1,6 мм. Полученные зависимости представлены на рис. 1. Установлено, что при ИДСПЭ алюминиевого сплава типа АМг6 важное значение имеет изменение  $I_{св.ср}$ , колебания которого могут привести к существенным отклонениям глубины проплавления  $h$  и ширины  $B$  шва (рис. 1, а). Высота выпуклости  $a$  шва изменяется незначительно. Сварочный ток  $I_{св.ср}$  оказывает большее влияние на глубину проплавления алюминиевых сплавов, чем сталей [8, 9], что объясняется их различными теплофизическими свойствами. Изменение значений  $U_{д.ср}$  в диапазоне рабочих токов заметного влияния на геометрию швов не оказывает (рис. 1, б).

Влияние вылета  $L$  электродной проволоки на  $I_{св.ср}$  и  $U_{д.ср}$  оценивали при различных режимах ИДСПЭ (рис. 2). Оптимальные средние значения  $I_{св.ср}$  и  $U_{д.ср}$  при начальном значении вылета электродной проволоки, равном 15 мм, выбирали исходя из условий обеспечения управляемого переноса металла по закону «1 импульс – 1 капля» и хорошего формирования наплавленных швов. На рис. 2 показано изменение значений  $I_{св.ср}$  и  $U_{д.ср}$  в зависимости от вылета электродной проволоки  $L = 15...30$  мм при ИДСПЭ без САС и с применением двухканальной САС.

Установлено, что с увеличением вылета  $L$  электродной проволоки значения  $I_{св.ср}$  и  $U_{д.ср}$  при сварке алюминиевых сплавов изменяются менее су-

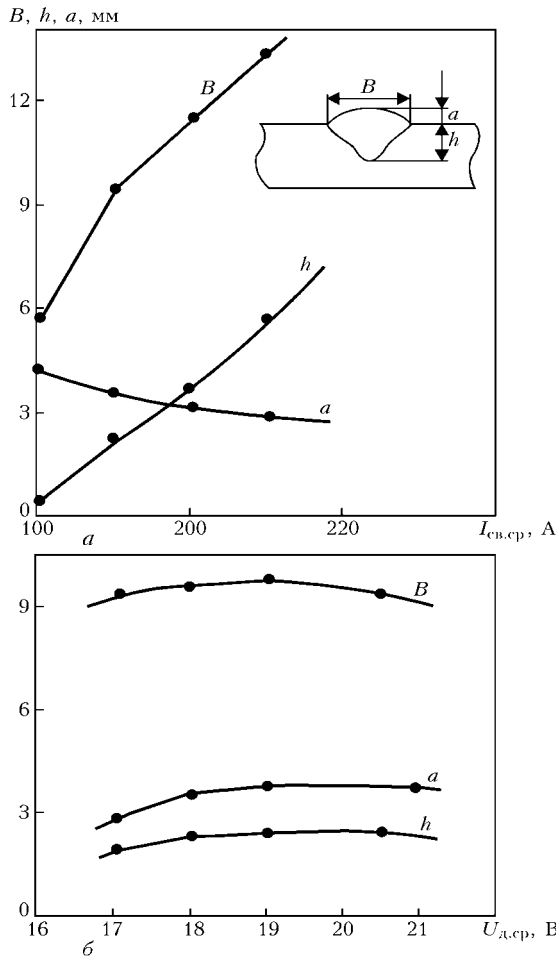


Рис. 1. Влияние  $I_{св.ср}$  (а) и  $U_{д.ср}$  (б) на геометрические параметры швов, выполненных ИДСПЭ на пластине из сплава АМг6 проволокой СвАМг6 диаметром 1,6 мм в аргоне, при скорости сварки 22 м/ч и длительности импульсов тока 2,1 мс: а —  $U_{д.ср} = 18$  В; б —  $I_{св.ср} = 150...155$  А

ществено, чем в случае сталей [6]. Однако и такие изменения приводят к образованию дефектов.

Результаты исследований макроструктуры металла швов, выполненных при наплавках ИДСПЭ на пластинах из сплава АМг6 толщиной 10 мм, позволили сделать вывод, что при увеличении вылета электродной проволоки наблюдаются неравномерность проплавления, несплавление металла шва с основным металлом, а также формирование в металле шва центрального кристаллита (рис. 3, а). Наплавленный металл состоит из двух слоев, что обусловлено различной ориентацией кристаллов. Центральный кристаллит представляет собой пачки одинаково ориентированных кристаллов (параллельно или под некоторым углом к оси шва). Формирование такой структуры может привести к ухудшению механических свойств металла шва и сварного соединения в целом. Увеличение вылета электродной проволоки сопровождается ростом длины дуги, что увеличивает количество и размер пор — от 0,2 до 1,0...1,5 мм (рис. 3, а). При использовании САС (рис. 3, б) достигается равномерность проплавления, несплавление с основным металлом отсутствует, могут образоваться отдельные фрагменты центрального кристаллита и поры незначительного (до 0,1 мм) размера.

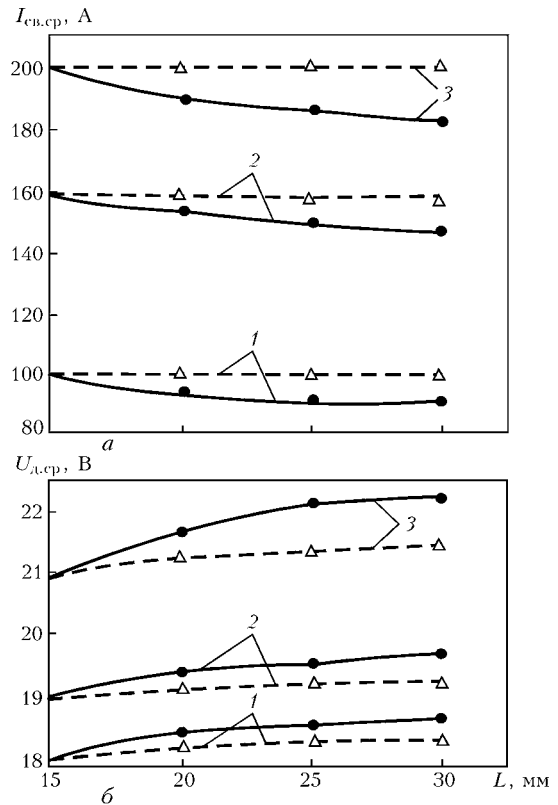


Рис. 2. Зависимость  $I_{св.ср}$  (а) и  $U_{д.ср}$  (б) от вылета  $L$  электродной проволоки при ИДСПЭ образца из алюминиевого сплава АМг6 проволокой СвАМг6 диаметром 1,6 мм в аргоне без САС (сплошные кривые) и с применением САС (штриховые). Иглычатые значения параметров ИДСПЭ при  $L = 15$  мм: 1 —  $I_{св.ср} = 100$  А,  $U_{д.ср} = 18$  В; 2 —  $I_{св.ср} = 160$  А,  $U_{д.ср} = 19$  В; 3 —  $I_{св.ср} = 200$  А,  $U_{д.ср} = 21$  В

Для оценки результатов комплексного влияния возмущающих факторов — увеличения вылета и уменьшения напряжения питающей сети — на механические свойства стыковых сварных соединений сплава АМг6 и эффективность применения в условиях этих возмущений двухканальных САС способом ИДСПЭ выполняли стыковые соединения пластин из сплава АМг6М толщиной 6 мм с V-образной разделкой. Сварку осуществляли за один проход сварочной проволокой СвАМг6 диаметром 1,6 мм в аргоне (ГОСТ 10157-79) на медной подкладке с формирующей канавкой. Угол разделки

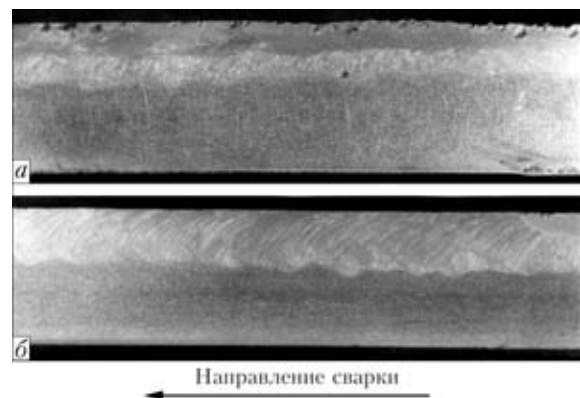


Рис. 3. Макрошлифы металла швов (продольный разрез), выполненных на пластине из сплава АМг6 способом ИДСПЭ проволокой СвАМг6 диаметром 1,6 мм в аргоне при  $L = 15...30$  мм без САС (а) и с использованием двухканальной САС (б)





**Таблица 1. Режимы ИДСПЭ стыкового соединения сплава АМг6М**

№ режима	Напряжение сети, В	Вылет электродной проволоки $L$ , мм	Напряжение на дуге $U_{д.ср}$ , В	Сварочный ток $I_{св.ср}$ , А	Частота импульсов $f$ , Гц	Скорость подачи проволоки $v_{под}$ , м/ч
1	376...400	14	21,4...21,8	190...195	117	372
2 (без САС)	342...354	24	18,5...19,5	170...176	117	372
3 (с САС)	342...354	24	21,4...21,6	190...191	Регулируется в пределах 140...156	Регулируется в пределах 355...372

Примечание. Постоянные следующие параметры: скорость сварки — 32 м/ч; длительность импульсов тока — 2,1 мс; их амплитуда — 525 А.

**Таблица 2. Механические свойства стыковых сварных соединений алюминиевого сплава АМг6М**

№ режима	$\sigma_b$ , МПа	$\alpha$ , град	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>
1	$\frac{318,0...328,0}{324,2}$	$\frac{40,0...52,0}{47,6}$	$\frac{18,0...20,7}{19,7}$
2	$\frac{190,0...220,0}{209,5}$	$\frac{13,0...55,0}{33,0}$	$\frac{13,3...14,6}{13,7}$
3	$\frac{308,3...332,3}{317,0}$	$\frac{25,0...48,0}{39,6}$	$\frac{19,2...20,6}{19,8}$

Примечание. Приведены данные испытаний 3...5 образцов.

кромки составлял 60°, притупление кромок — 1,5 мм (без зазора). В табл. 1 приведены параметры режимов ИДСПЭ.

Режим № 1 осуществляли на оптимальных для пластин толщиной 6 мм из сплава АМг6М пара-

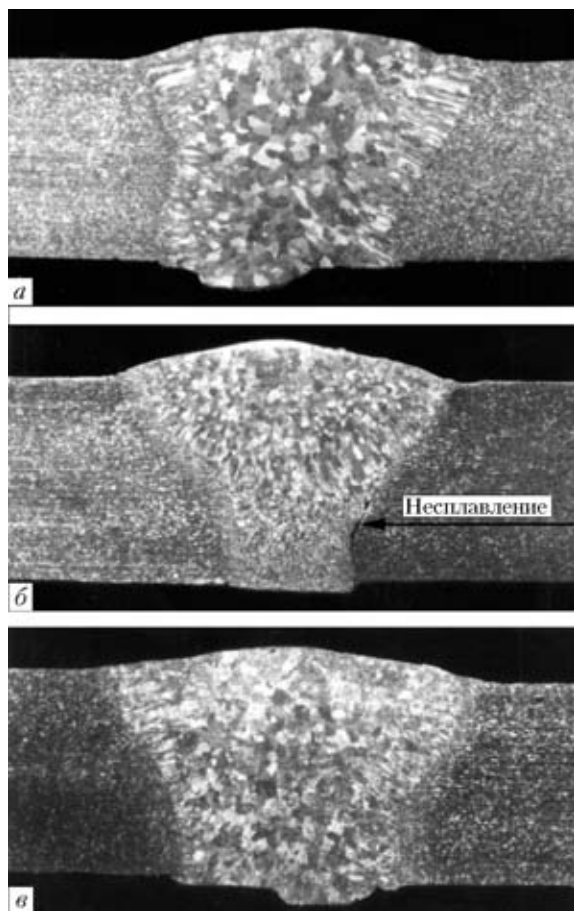


Рис. 4. Макрошлифы стыковых сварных соединений пластин из сплава АМг6М толщиной 6 мм, полученных ИДСПЭ: *а* — режим без возмущений; *б* — с возмущениями по вылету электродной проволоки и напряжению питающей сети без САС; *в* — с применением САС в условиях действия возмущений

метрах без действия возмущающих факторов; режим № 2 (без САС) выполняли при действии возмущающих факторов — увеличение вылета электродной проволоки и понижение напряжения питающей сети. Это привело к изменению значений  $I_{св.ср}$  со 190 до 170 А и  $U_{д.ср}$  — с 21,4 до 18,5 В. Режим № 3 осуществляли при тех же возмущениях, что и режим № 2, но с применением САС, в которой начальные значения значений  $I_{св.ср}$  и  $U_{д.ср}$  были такими же, как и при режиме № 1. Результаты механических испытаний образцов на растяжение, загиб и ударную вязкость, которые проводили в соответствии с ГОСТ 6996–66, представлены в табл. 2.

Установлено, что по сравнению с оптимальным режимом увеличение вылета электродной проволоки и снижение напряжения питающей сети приводят к уменьшению временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  на 35,7 %, угла загиба  $\alpha$  — на 30,6 % и ударной вязкости  $KCV$  — на 30,5 %. На рис. 4 представлены макрошлифы стыковых сварных соединений, выполненных на режимах, приведенных в табл. 1. Действие указанных выше возмущающих факторов привело к возникновению различных дефектов, например несплавлений с боковой стенкой, непроваров (рис. 4, *б*), и ухудшило механические свойства сварных соединений.

Использование двухканальной САС процесса ИДСПЭ при действии указанных возмущений позволило устранить дефекты типа непроваров и несплавлений. При этом механические свойства сварных соединений находятся на уровне свойств, полученных при режимах без возмущений (см. табл. 2 и рис. 4, *а*, *в*).

### Выводы

1. При ИДСПЭ алюминиевого сплава АМг6 увеличение вылета электродной проволоки или уменьшения напряжения питающей сети приводят к изменению  $U_{д.ср}$  и  $I_{св.ср}$  и возникновению дефектов типа пор, непроваров, несплавлений, а также формированию структурной неоднородности в виде центрального кристаллита. Наличие возмущающих факторов снижает на 30...35 % механические свойства стыковых соединений, полученных способом ИДСПЭ.

2. Применение двухканальной САС процесса ИДСПЭ алюминиевого сплава АМг6М позволяет при комплексном действии возмущающих факторов обеспечить механические свойства сварных соединений на уровне свойств, полученных при оптимальных режимах сварки без возмущений.



1. *Влияние* режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АДО на форму и пористость швов // В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 4. — С. 57–60.
2. *Ghosh P. K., Gupta S.R., Gupta P. C., Rathi R.* Influence of pulsed current welding on the microstructure and porosity content of Al–Zn–Mg alloy weldment // Pract. Metallogr. — 1990. — № 12. — P. 613–626.
3. *Ghosh P. K.* An analysis of weld characteristics as a function of pulse current MIG welding parameters // Intern. J. for the Joining of Materials. — 1996. — 8, № 4. — P. 157–161.
4. *Сварка* конструкций летательных аппаратов из алюминиевых сплавов больших толщин / О. Н. Кудряшов, О. М. Новиков, И. В. Алексеев и др. // Свароч. пр-во. — 2001. — № 12. — С. 31–33.
5. *Стабилизация* процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
6. *Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шимановский Ю. О.* Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с автоматической стабилизацией параметров режимов // Там же. — 2004. — № 1. — С. 8–11.
7. *А. с. 1682076 СССР, МКП В 23 К 9/09.* Источник тока для импульсно-дуговой сварки / В. М. Павшук, П. П. Шейко. — Оpubл. 07.10.91; Бюл. № 37.
8. *Импульсно-дуговая* сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом / С. Т. Римский, В. Г. Свечинский, П. П. Шейко и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 2. — С. 38–41.
9. *Mandal A., Parmar R. S.* Effects of pulse parameters on weld bead geometry // Joining of Materials. — 1996. — 8, № 2. — P. 69–75.

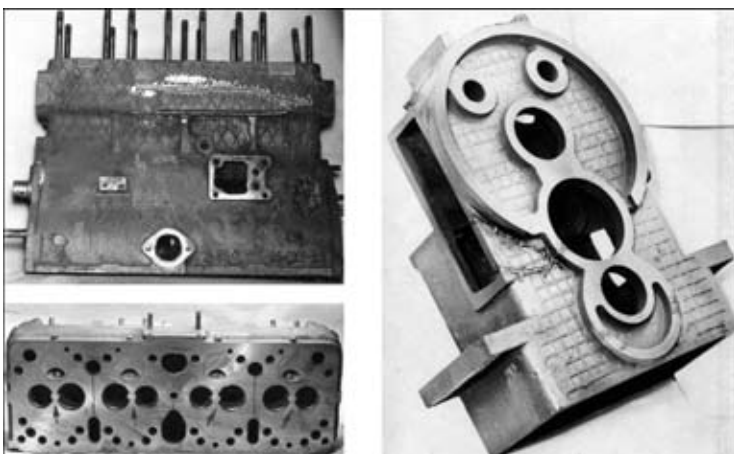
The effectiveness of application of two-dimensional systems of automatic stabilization of the process of consumable-electrode pulsed-arc welding of aluminium alloys under the effect of disturbing factors has been established experimentally. It is shown that the mechanical properties of butt welded joints of AMg6 alloy deteriorate with increase of electrode wire extension and lowering of the mains voltage. Use of two-dimensional systems of automatic stabilization allows ensuring the mechanical properties of butt welded joints on the level of properties achieved in welding in optimum modes without disturbances.

Поступила в редакцию 28.12.2004

## МЕХАНИЗИРОВАННАЯ СВАРКА ЧУГУНА САМОЗАЩИТНОЙ ПРОВОЛОКОЙ СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ БЕЗ ПОДОГРЕВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Основные особенности нового способа сварки конструктивных чугунов заключаются в следующем:*

- *используется тонкая проволока сплошного сечения марки ПАНЧ-11 из специального сплава на никелевой основе;*
- *механизированная сварка выполняется открытой дугой;*
- *швы на тонкостенных деталях выполняются с очень низким тепловложением по сравнению с ручной сваркой штучными электродами;*
- *исключены высокий подогрев детали и последующая термическая обработка.*



*Металл шва представляет собой пластичный железоникелевый сплав с пределом прочности до 450 МПа и твердостью HV 170...190. Прочность соединений в целом определяется качеством свариваемого чугуна: разрыв образцов при испытании происходит по основному металлу.*

**Основное назначение.** *Ремонт деталей из качественных чугунов, имеющих временное сопротивление разрыву до 500 МПа, с гарантией высокой прочности, герметичности и обрабатываемости сварных соединений.*

*Массовый ремонт тонкостенных корпусных деталей машин и механизмов ответственного назначения.*

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 18  
 Тел./факс: (39044) 287 31 84  
 E-mail: maksimov@paton.kiev.ua



## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ДУГОВЫХ СПОСОБАХ СВАРКИ

**Р. Н. РЫЖОВ**, канд. техн. наук, **В. Д. КУЗНЕЦОВ**, д-р техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Предложены зависимости, позволяющие оптимизировать параметры электромагнитного воздействия. Адекватность полученных зависимостей реальным условиям сварки подтверждена сравнительным анализом расчетных и экспериментальных данных. Проведен анализ влияния параметров режимов сварки и теплофизических свойств материалов на оптимальные режимы электромагнитных воздействий.

*Ключевые слова:* электромагнитное воздействие, управляющие магнитные поля, геометрические характеристики сварочной ванны, теплофизические свойства материалов

Контролируемое управление вынужденными перемещениями потоков расплава ванны при сварке с электромагнитными воздействиями (ЭМВ) позволяет значительно улучшить механические свойства швов, повысить их коррозионную стойкость и стойкость против образования горячих и холодных трещин, снизить уровень пористости. Анализ данных различных авторов указывает на то, что независимо от способов и условий сварки существует определенный диапазон параметров ЭМВ, при котором достигается максимальное повышение технологических и физико-химических свойств сварных соединений. Следовательно, в этом диапазоне проявляются закономерности, определяющие условие оптимальности ЭМВ.

Цель данной работы — установление физически обоснованного критерия оптимальности ЭМВ и разработка с его использованием инженерной методики выбора параметров ЭМВ с учетом закономерностей, определяющих эффективность его применения.

Под действием управляющего магнитного поля (УМП) в сварочной ванне (рис. 1) формируются потоки, перемещение которых из головной в хвостовую часть происходит поочередно вдоль каждого из боковых фронтов кристаллизации с частотой, соответствующей интервалу реверсирования УМП. При этом фронт кристаллизации, относительно которого происходит перемещение перегретого расплава из головной части сварочной ванны, оплавляется, а противоположный кристаллизуется с максимальными скоростями (на поверхности ванны соответственно затемненная и заштрихованная области). Остаток и оплавление одного бокового фронта затвердевания и, наоборот, ускоренное перемещение противоположного контролируются градиентами температуры перед фронтами с периодичностью, соответствующей частоте изменения направлений перемещения потоков в ванне при реверсировании магнитного поля. В работе [1] сделан вывод о том, что необходимым и достаточным условием контролируемой периодичности роста

кристаллитов по всей межфазной поверхности, а следовательно, и формирования мелкозернистой структуры с минимальной химической неоднородностью является периодическое достижение тепловым фронтом потока расплавленного металла наиболее удаленной от дуги зоны кристаллизующейся части ванны. Условие оптимальности ЭМВ представлено равенством  $S_{\text{пот}} = L_{\text{кр}}$ , где  $S_{\text{пот}}$  — путь, проходимый потоком при его реверсивном движении;  $L_{\text{кр}}$  — длина боковой кромки кристаллизующейся части ванны.

По мере развития работ в этом направлении получены данные, уточняющие взаимосвязь между скоростями кристаллизации и градиентами температуры у межфазной поверхности. Показано [2], что в полном периоде кристаллизации существует максимум повышения фактических скоростей затвердевания, приходящийся на определяемую градиентом степень переохлаждения в условиях, при которых время существования перегретого расплава в глубине хвостовой части ванны минимально. Следовательно, только путь перемещения потока вблизи фронта кристаллизации на длину  $L_{\text{кр}}$ , оставаясь необходимым, не является достаточным условием оптимальности. Экстремальные зависи-

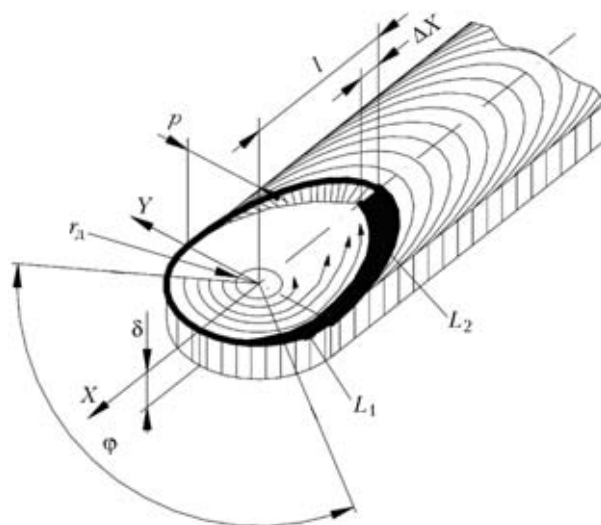


Рис. 1. Схема сварочной ванны при сварке с ЭМВ (обозначения см. в тексте)



мости фактических скоростей затвердевания от параметров ЭМВ проявляются в условиях, когда время перемещения потока, ограниченное расстоянием  $L_{кр}$ , согласуется со временем прорастания фронтом кристаллизации неравновесной переохлажденной зоны. Указанные закономерности, предопределяющие формирование мелкокристаллических структур при сварке с ЭМВ, позволяют сформулировать физически обоснованный критерий оптимальности в виде равенства

$$\tau_k = \tau_{II}, \quad (1)$$

где  $\tau_k$  — время прорастания фронтом кристаллизации переохлажденной неравновесной зоны с максимальными скоростями;  $\tau_{II}$  — время перемещения потока на длину  $L_{кр}$ .

Составляющие равенства (1) могут быть определены с использованием существующих представлений о закономерностях проявления особенностей кристаллизации и вынужденных перемещениях потока расплава ванны при сварке с ЭМВ.

Для эффективного измельчения первичной структуры за время интервала реверсирования фронт кристаллизации должен продвигаться на расстояние, равное ширине двухфазной области  $\Delta X$  (рис. 1). С учетом этого время прорастания фронтом кристаллизации этой зоны может быть представлено зависимостью

$$\tau_k = \frac{\Delta X}{v_{св} \cos \alpha}, \quad (2)$$

где  $v_{св}$  — скорость сварки;  $v_{св} \cos \alpha$  — средняя скорость кристаллизации рассматриваемого участка.

При определении  $\tau_{II}$  исходили из того, что при сварке с ЭМВ потоки расплава формируются в головной части ванны с поперечным сечением  $\Delta S = (p - r_d)\delta$ , где  $p$  — полуширина головной части ванны;  $r_d$  — радиус отклонения дуги поперечной составляющей УМП;  $\delta$  — толщина свариваемого соединения (рис. 1). Для того, чтобы поток достиг удаленной на расстояние  $L_{II} = L_1 + L_2$  точки фронта кристаллизации и при этом с учетом сложности гидродинамики ванны в ней гарантированно произошло заданное изменение градиента температур, через сечение  $\Delta S$  необходимо переместить объем расплава

$$V_3 = \Delta S L_{II} = (p - r_d)\delta L_{II}. \quad (3)$$

Строгое расчетное определение объема расплава, проходящего за время  $\tau_{II}$  через сечение  $\Delta S$ , осложнено наличием поля скоростей его элементарных объемов, параметры которого зависят от распределений в зоне сварки аксиальной составляющей индукции УМП  $B_z$  и горизонтальной составляющей плотности тока в сварочной ванне. Проведенная предварительная обработка экспериментальных данных показала, что данный параметр можно достаточно точно оценивать с помощью размерного комплекса, полученного на основе формулы Пуазейля:

$$\frac{V_3}{\tau_{II}} = 0,012 \frac{\delta(p - r_d)^2 B_z I_{св}}{L_{II} \eta}, \quad (4)$$

где  $I_{св}$  — сварочный ток;  $\eta$  — динамическая вязкость расплава.

С учетом (3) и того, что при ЭМВ с использованием реверсивных аксиальных магнитных полей  $\tau_{II} = t_p$  между двумя последовательными сменами полярности тока намагничивания, пропускаемого через электромагнит устройства генерирования в зоне сварки УМП, зависимость (4) можно преобразовать следующим образом:

$$B_z t_p = A = 83,3 \frac{L_{II}^2 \eta}{(p - r_d) I_{св}}, \quad (5)$$

где  $A = B_z t_p$  — обобщенный параметр ЭМВ.

В общем случае

$$A = \int_0^{t_p} |B(t)| dt. \quad (6)$$

Значение  $L_{II}$  определяли с учетом следующих допущений: во время сварки процесс плавления и кристаллизации осуществляется в плоскости; форма фронта плавления описывается уравнением окружности, а фронта кристаллизации — уравнением эллипса (рис. 1). Тогда

$$L_{II} = L_1 + L_2 = \pi p(1 - \varphi/180)/2 + \pi(1,5(p + l) - \sqrt{pl})/4,$$

где  $p$  и  $l$  — соответственно полуширина и длина кристаллизующейся части ванны;  $\varphi$  — центральный угол головной части ванны, ограничивающий объем расплава, в котором растекается основная часть  $I_{св}$  (в диапазоне  $B_z = 12...25$  мТл,  $\varphi = 64 + 7,03(B_z - 12)$  [3]).

Геометрические параметры ванны определяли по рекомендуемым в работе [4] зависимостям:

$$p = (q\sqrt{2}/(\pi e)) / (n2v_{св} c\gamma \delta T_{пл}), \quad (7)$$

$$l = (q^2(e - 1)) / (m4\pi\lambda c\gamma v_{св} e\delta^2 T_{пл}^2), \quad (8)$$

где  $q$  — мощность источника тепла;  $\lambda$ ,  $c\gamma$  и  $T_{пл}$  — соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и температура плавления свариваемого материала;  $n$ ,  $m$  — коэффициенты, введенные автором работы [4] для учета различий между расчетными и реальными размерами ванны (с их помощью также учитывали изменения геометрии ванны, вызванные размыванием кромок горячими потоками расплава).

В зависимости (2)  $\Delta X = l_S - l_L$ . Длины  $l_S$  и  $l_L$  рассчитывали с помощью зависимости (8), подставляя в нее вместо  $T_{пл}$  соответственно температуры солидуса  $T_S$  и ликвидуса  $T_L$  свариваемых материалов.

Вид зависимости (5) объективно отражает физические процессы, характерные для сварки с ЭМВ. Так, увеличению геометрических параметров ванны и вязкости расплава должно соответствовать

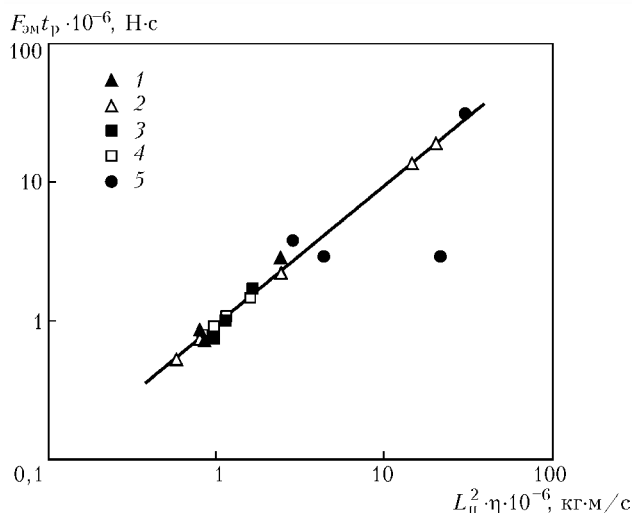


Рис. 2. Зависимость импульса электромагнитной силы от квадрата расстояния, проходимогo потоком с вязкостью  $\eta$  за период ЭМВ: 1, 2 — соответственно экспериментальные и расчетные значения для нержавеющей сталей; 3, 4 — то же для алюминиевых сплавов; 5 — экспериментальные значения для технического титана и его сплавов

возрастание параметров ЭМВ. С увеличением радиуса отклонения дуги радиальной составляющей УМП уменьшается скорость заполнения расплавом объема  $V_3$ , что также требует корректировки в сторону увеличения параметров ЭМВ. В большей мере эта закономерность наблюдается при реализации технологий сварки неплавящимся электродом на переменном токе или обратной полярности, широко применяемых при сварке алюминия и сплавов на его основе, когда отклонению дуги способствует округлая форма конца неплавящегося электрода. С расширением температурного интервала  $T_L - T_S$ , что характерно для сплавов со сложными системами легирования, увеличивается ширина зоны концентрационного переохлаждения, что позволяет несколько уменьшить интенсивность ЭМВ. Следует отметить, что расчет по зависимости (5) оптимальных параметров ЭМВ для материалов с узким температурным интервалом  $T_L - T_S$  приводит к чрезвычайно высоким значениям параметра  $A$ , применение которых может нарушать стабильность процесса сварки.

Адекватность разработанной расчетной схемы реальным условиям сварки проверяли путем сравнения расчетных и экспериментальных оптимальных значений параметров УМП для нержавеющей сталей и сплавов [5–10], алюминиевых [11–14] и титановых [15–19] сплавов. Учитывая, что авторы указанных публикаций реализовывали как непрерывные, так и пульсирующие с различной скважностью УМП, значения обобщенного параметра ЭМВ определяли с помощью зависимости (6). Проведенные с использованием зависимости (5) расчеты импульса электромагнитной силы показали, что для рассматриваемых условий сварки нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов погрешность в расчетах не превышает 10... 15% (рис. 2). С учетом принятых допущений такие результаты можно считать удовлетворительными.

Проверка показала значительные отличия расчетных и экспериментальных параметров режимов

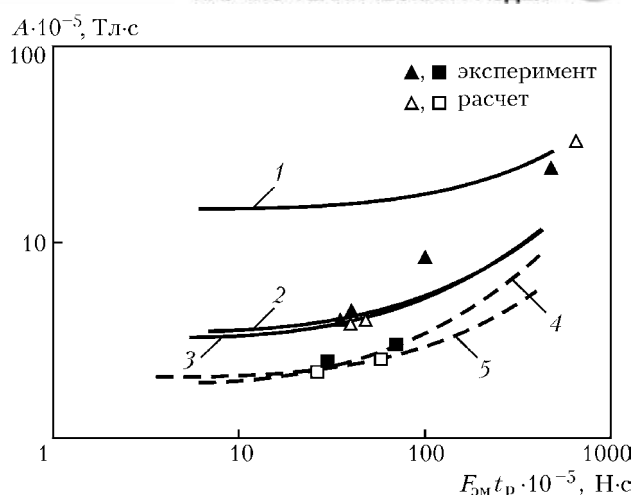


Рис. 3. Зависимость параметра  $A$  от импульса электромагнитной силы: 1–3 — режимы сварки нержавеющей сталей с  $q/v$  соответственно 378, 524 и 820 кДж/м; 4, 5 — то же для алюминиевых сплавов с  $q/v$  соответственно 310 и 650 кДж/м

ЭМВ при сварке технического титана и сплавов на его основе. В данном случае чрезмерно высокие расчетные значения параметра  $A$  обусловлены узким температурным интервалом  $T_L - T_S$  и тем, что из-за низкой теплопроводности сварочная ванна имеет большую длину  $L_{п}$ . Поскольку экспериментальные режимы ЭМВ, по мнению авторов [15–19], были оптимальными и позволили успешно решить задачи дегазации ванны и повышения коррозионной стойкости металла швов, то в дальнейшем их использовали при анализе факторов, влияющих на параметры ЭМВ.

В результате обработки расчетных и экспериментальных данных установлено, что при сварке образцов одинаковой толщины, изготовленных из материалов одного класса, не всегда большим энерговыделением в шов соответствуют большие оптимальные значения параметров ЭМВ (рис. 3). Такое несоответствие происходит из-за различной степени форсированности применяемых режимов сварки. При неизменном значении погонной энергии  $q/v$  в случае повышения  $I_{св}$  происходит возрастание длины кристаллизующейся части ванны. Происходящее одновременно с этим повышение импульса электромагнитной силы не позволяет достигать максимальной эффективности воздействия, что требует соответствующего увеличения обобщенного параметра ЭМВ. Именно из-за этого при меньшем в 1,5 раза значении  $q/v$ , но практически в 3 раза более форсированном режиме сварки, требуется в 2,75 раза большее оптимальное значение  $A$  (рис. 3).

Оптимальные параметры ЭМВ существенно зависят от теплофизических свойств свариваемых материалов. Так, алюминиевые сплавы обладают большей теплопроводностью, но значительно меньшей удельной массой и температурой плавления, чем нержавеющие стали. Поэтому оптимальные параметры ЭМВ при сварке алюминиевых сплавов более чем в 2 раза ниже, чем для нержавеющей сталей (рис. 3, 4). У титановых сплавов при большей удельной массе и температуре плавления теплопроводность в 4,5 раза меньше, чем у алюми-

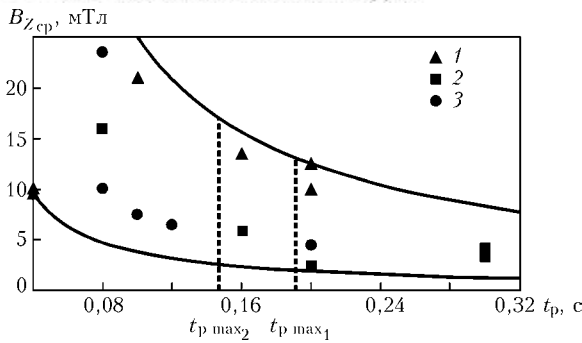


Рис. 4. Выбор оптимального режима ЭМВ: 1–3 — экспериментальные режимы ЭМВ соответственно для нержавеющей, алюминиевых и титановых сплавов; кривые, ограничивают область оптимальных значений индукции УМП при заданной длительности  $t_p$ ;  $t_{p \max 1}$ ,  $t_{p \max 2}$  — максимальные длительности  $t_p$  для нержавеющей и алюминиевых сплавов

ниевых. Такие различия теплофизических свойств при одинаковой толщине соединений требуют при сварке титана больших значений параметра  $A$ , чем при сварке алюминиевых сплавов, что не согласуется с публикуемыми экспериментальными данными. Такое несоответствие объясняется тем, что во всех рассматриваемых случаях при сварке алюминиевых сплавов применяли более форсированные режимы.

После определения с помощью зависимости (5) оптимального значения параметра  $A$  следует рассчитать значение  $B_z = A/t_p$ . Учитывая, что известные устройства управления ЭМВ синхронизированы с частотой питающей сети, изменяя  $t_p$  с шагом 0,01 с, строят зависимость  $B_z(t_p)$ , которая имеет экспоненциальную форму, аналогичную кривым, ограничивающим область их значений, наиболее часто применяемым на практике (рис. 4). При жестких режимах ЭМВ, характеризующихся увеличенными значениями  $B_z$  и кратковременными  $t_p$ , на поверхности швов образуется чешуйчатость как результат периодического набрасывания расплава на фронт кристаллизации. Поэтому такие режимы не применяют при многопроходной сварке на этапе выполнения верхних валиков. Однако при слишком мягких режимах ЭМВ длительное перемещение расплава вдоль боковой поверхности ванны может вызывать ее значительное подплавление, следствием чего может быть нестабильность формы линии сплавления.

Выбор параметров ЭМВ необходимо осуществлять с учетом способа сварки. Так, при сварке плавящимся электродом повышение  $B_z$  выше критических значений вызывает повышенное разбрызгивание. Режимы ЭМВ при сварке алюминиевых сплавов на переменном токе характеризуются более длительными  $t_p$  и меньшими  $B_z$ , что связано со стабильностью процесса горения дуги. Для обеспечения хороших манипуляционных возможностей инструмента и обзора зоны сварки при ручных способах, электромагнит генерирования УМП, расположенный на корпусе горелки, должен иметь минимальные намоточные параметры и массу, что не позволяет создавать широкий диапазон значений  $B_z$ . В этом случае требуемое значение параметра  $A$  достигают путем увеличения длительности  $t_p$ .

В случае, когда ЭМВ осуществляют с использованием пульсирующих УМП, характеризующихся наличием между импульсами УМП пауз различной длительности, наиболее часто  $B_z = 5 \dots 25$  мТл при  $t_p = 0,08 \dots 0,2$  с (рис. 4). При этом с повышением скважности импульсов УМП снижается среднее значение  $B_z$ , что требует пропорционального увеличения параметров ЭМВ. Более интенсивное воздействие достигается в случае, когда за время  $t_p$  между импульсами УМП отсутствуют паузы. Это позволяет сократить диапазон  $B_z$  до  $5 \dots 15$  мТл, а  $t_p$  — до  $0,04 \dots 0,08$  с. Отмеченные выше отличия диапазонов значений параметра  $A$  между нержавеющей стали и сплавами алюминия и титана на практике происходят из-за соответствующих отличий индукции УМП при одинаковом диапазоне длительностей интервалов реверсирования. Как было отмечено выше, режим ЭМВ будет оптимальным при выполнении равенства (1). При этом, если  $\tau_k > t_p$ , оставшуюся часть  $L_n$  расплав может пройти по инерции. В противном случае достижение максимального эффекта от применения ЭМВ невозможно. Данное обстоятельство ограничивает максимальные значения  $t_p$ , показанные на рис. 4 вертикальными прямыми.

Таким образом, разработанная расчетная схема, основанная на одновременном учете влияния на гидродинамику расплава геометрических характеристик ванны и теплофизических свойств свариваемых материалов, позволяет оптимизировать параметры электромагнитного воздействия при сварке материалов с широким температурным интервалом  $T_L - T_S$  с точностью, достаточной для практического использования.

1. Пахаренко В. А. Расчет оптимальных параметров магнитного поля при аргодуговой сварке с перемешиванием ванны // Автомат. сварка. — 1982. — № 7. — С. 39–41.
2. Короб Н. Г., Кузнецов В. Д., Черныш В. П. Оценка воздействия управляющего магнитного поля на кристаллизацию при дуговой сварке // Там же. — 1990. — № 2. — С. 33–36.
3. Черныш В. П. Расчет параметров движения металла сварочной ванны при электромагнитном перемешивании // Там же. — 1977. — № 10. — С. 12–16.
4. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 698 с.
5. Рыжов Р. Н., Скачков И. О., Черныш В. П. Повышение сопротивляемости сварных швов образованию горячих трещин при ручной дуговой сварке неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1997. — № 4. — С. 25–29.
6. Черныш В. П., Кузнецов В. Д. Сопротивляемость горячим трещинам швов, кристаллизующихся в условиях перемешивания // Свароч. пр-во. — 1971. — № 6. — С. 41–42.
7. Черныш В. П., Поповский В. Ю. Особенности движения металла сварочной ванны при электромагнитном перемешивании // Автомат. сварка. — 1977. — № 4. — С. 4–6.
8. Черныш В. П., Кузнецов В. Д., Турык Э. Влияние электромагнитного перемешивания сварочной ванны на температурный интервал хрупкости металла шва // Там же. — 1977. — № 9. — С. 14–17.
9. Пахаренко В. А. Кинетика кристаллизации и формирование свойств сварных швов при сварке с электромагнитным перемешиванием: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев: КПИ, 1979. — 177 с.
10. Сварка плавящимся электродом в защитных газах с электромагнитным перемешиванием / В. П. Игумнов, С. Н. Мальцев, Ю. Д. Коньков и др. // Автомат. сварка. — 1983. — № 3. — С. 41–42, 59.
11. Структура и свойства металла швов на сплаве АМг6 при сварке с электромагнитным перемешиванием / В. П. Чер-



- ныш, В. В. Сыроватка, А. Ф. Гриценко, Б. П. Ржанов // Там же. — 1972. — № 11. — С. 16–19.
12. Новиков О. М., Крюковский В. Н., Жандарев А. П. Влияние электромагнитного перемешивания сварочной ванны на процессы дегазации и разрушения окисных плен в сварных швах сплава АМг6 // Свароч. пр-во. — 1975. — № 11. — С. 14–15.
  13. Влияние управляющего магнитного поля на структуру и герметичность сварных швов сплава АМг6 / Ю. И. Ситявин, Г. Л. Зубриенко, А. Е. Эйфельштейн и др. // Там же. — 1978. — № 9. — С. 33–35.
  14. Чаюн А. Г., Сыроватка В. В., Матяш В. И. Дуговая сварка алюминиевого сплава 01420 с применением электромагнитного перемешивания // Автомат. сварка. — 1981. — № 6. — С. 19–21.
  15. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и свойства сплава ВТ6С / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. П. Черныш и др. // Свароч. пр-во. — 1972. — № 5. — С. 8–9.
  16. Влияние электромагнитного перемешивания на свойства сварных соединений тонколистового титана / Г. М. Шеленков, В. Э. Трояновский, А. Н. Брискман и др. // Там же. — 1974. — № 12. — С. 21–22.
  17. Влияние электромагнитного перемешивания сварочной ванны на свойства соединений сплава ВТ1-0 / В. Е. Блащук, С. М. Гуревич, Л. М. Оноприенко и др. // Автомат. сварка. — 1976. — № 8. — С. 40–43.
  18. Особенности формирования швов при дуговой сварке титана с электромагнитным перемешиванием / Г. М. Шеленков, В. П. Черныш, С. М. Гуревич и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 3. — С. 24–25.
  19. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У., Йулдашев А. Т. Влияние электромагнитного воздействия на процесс первичной кристаллизации титана // Там же. — 1978. — № 5. — С. 1–3.

Dependencies are given which allow optimizing the parameters of electromagnetic action. Adequacy of the derived dependencies to the actual welding conditions is confirmed by comparative analysis of the calculated and experimental data. Analysis is performed of the influence of both the welding parameters and thermophysical properties of materials on the optimum range of the mode of electromagnetic action.

Поступила в редакцию 14.05.2005

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

*Для улучшения качества лазерной сварки конструкционных сталей в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны новые технологии с использованием дополнительных технологических приемов: лазерная сварка по слою флюса, лазерная сварка с присадочной проволокой и гибридная лазерная + МАГ сварка. Разработанные технологии позволяют выполнять сварку в различных пространственных положениях.*

*Толщина свариваемых конструкционных сталей — 0,8...10 мм за один проход; до 20 мм — за четыре прохода; диапазон мощностей лазерного излучения — 1,5...4 кВт; скорость сварки — 60...600 м/ч; гибридной — 40...450 м/ч на режимах дуговой сварки  $I = 90...200$  А,  $U = 22...26$  В.*

*Металлографические исследования и механические испытания показали улучшенное качество швов по сравнению с обычной лазерной сваркой в защитных газах (рис. 1).*

*Разработана необходимая технологическая оснастка (рис. 2).*

*По сравнению с другими способами сварки производительность разработанных технологий значительно выше (скорость сварки стали толщиной 1 мм — до 600 м/ч). Процесс имеет высокую термическую локальность, что обеспечивает меньшую ЗТВ. Характер проплавления — кинжальный, коэффициент формы шва — менее 1, отсутствуют термодформации свариваемых изделий, не требуется финишная механическая обработка. В связи с малым (1...3 мм) размером сварочной ванны выброс вредных аэрозолей во много раз меньше, чем при дуговых (плазменных) способах сварки, что делает технологию экологически безопасной и улучшает условия труда.*

*Новая технология предназначена для сварки объемных стовых панелей, труб (в том числе поворотных и неповоротных стыков), разнотолщинных заготовок, высокоскоростной сварки тонких сталей в судостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности.*

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
 отд. № 77  
 Тел. (38044) 271 52 28, 271 50 83; факс: (38044) 227 15 66  
 E-mail: shelyagin@paton.kiev.ua

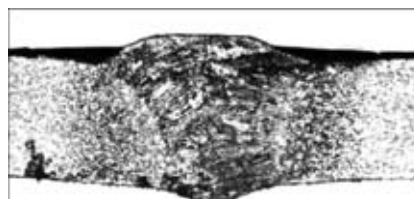


Рис. 1. Макроструктура соединения вырубленных на гильотинных ножницах листов из стали 08кп толщиной 1 мм, выполненного лазерной сваркой с приса-

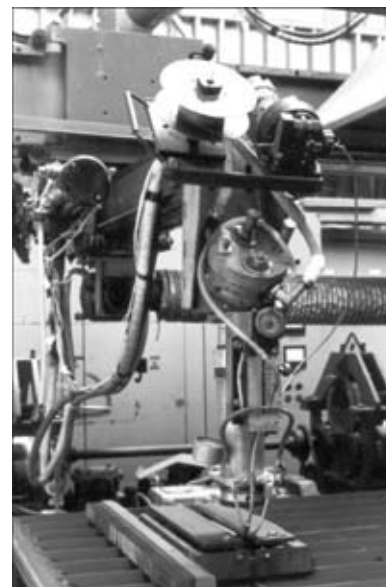


Рис. 2. Общий вид фрагмента двухкоординатного манипулятора со сварочной головкой и механизмом подачи присадочной проволоки



## СТАЛЬ И СВАРКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

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

В обзоре, составленном по материалам зарубежной печати, современное строительство показано как самостоятельная отрасль экономики ведущих стран мира, для которой характерно растущее применение стальной металлопродукции и сварочной техники. Оценены примерные объемы использования стали и стальной металлопродукции в промышленном и гражданском строительстве ряда стран. Показано, что сварка и родственные технологии являются альтернативными процессами обработки и соединения в производстве и сооружении стальных строительных металлоконструкций. Представлены прогнозные тенденции развития сектора сварочного оборудования для сварки на мировом рынке сварочной техники.

*Ключевые слова:* сварка, резка, строительные металлоконструкции, сварочная техника, рынок, прогнозные тенденции

✧ Современное промышленное и гражданское строительство и строительная индустрия занимают одно из ведущих мест в экономике передовых стран мира как самостоятельный отраслевой сектор. Так, например, в США в 2000 г. общие затраты на строительство составили 346 млрд дол., что соответствовало третьему месту после таких ведущих отраслей промышленного производства США, как автомобилестроение (510,7) и производство приборов и электронной техники (436,4 млрд дол.).

Одной из особенностей современного строительства является активное наращивание объема потребления и переработки металлических конструкционных материалов и в первую очередь стали. Несмотря на появление таких альтернативных конструкционных материалов, как алюминий и пластмассы, сталь остается базовым конструкционным материалом, мировое производство которой в 2004 г. превысило 1,0 млрд т. Переход на широкое применение стальных сварных металлоконструкций, часто взамен железобетонных, при сооружении промышленных и торговых объектов, высотных зданий и спортивных сооружений, транспортных переходов, морских платформ и резервуарных парков и др. обеспечивает снижение стоимости строительно-монтажных работ, повышение надежности и долговечности строительных сооружений при снижении их общей массы.

Объемы применения стальных металлоконструкций при строительстве различных по назначению объектов и сооружений в каждой из стран имеют свои особенности. На рис. 1 приведены диаграммы, характеризующие долю стальных конструкций при строительстве трех групп объектов: высотных зданий и архитектурных сооружений, промышленных зданий и объектов, а также мостов в ряде европейских стран. Показано, что основное применение находят стальные конструкции в промышленном строительстве, на втором месте — сооружение мостов и путепроводов. В ФРГ применение стальных конструкций заметно ниже, чем во Франции и Великобритании (хотя ФРГ про-

изводит стали больше, чем Франция и Великобритания вместе взятые). Исследование было проведено немецкими металлургами в конце 1990-х гг. и позволило им определить большие потенциальные возможности внутренних поставок стальной металлопродукции для строительного сектора.

✧ Применение стали и стальной металлопродукции в строительстве отдельных стран зависит от ряда факторов, и, в первую очередь, уровня развития национальной экономики, масштабов строительства и общего объема применения стали. Представление о величине внутреннего потребления стали в ведущих странах дают следующие данные за 2003 г. (млн/т): Китай — 258,1; США — 103,9; Япония — 77,0; ФРГ — 37,5; Италия — 33,6; Россия — 26,8; Украина — 16,5; Великобритания — 13,9.

До последнего времени ведущие позиции по применению стальных металлоконструкций в строительном секторе занимала Япония, которая (несмотря на некоторые экономические трудности и снижение объемов строительства) потребляет до 25...30 % общего потребления стали. При этом большая ее доля (примерно 4/5) идет непосредственно на промышленное строительство, в частности, сооружение мостов. В середине 1990-х годов масштабы применения стальных металлоконструкций только в промышленном строительстве ведущих стран Европейского Союза выражались в 5...10 % общего объема потребления стали в соответствующих странах. В России в 2001 г. по данным ГНЦ РФ «ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина» потребление стального проката в строитель-

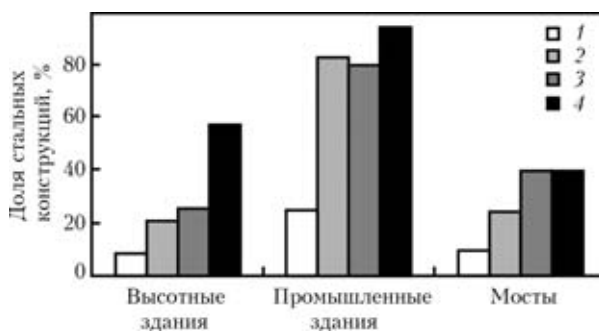


Рис. 1. Доля стальных конструкций при строительстве различных объектов в некоторых странах ЕС: 1 — ФРГ; 2 — Франция; 3 — Нидерланды; 4 — Великобритания



стве превысило 6,0 млн т или более 20 % общего внутреннего потребления.

Основу фонда стальных металлоконструкций Украины составляют конструкции промышленных зданий и сооружений, доля которых достигает 65 %. Однако в последние годы объемы промышленного строительства и пополнения фонда стальных конструкций в Украине резко сократились.

Таким образом, сугубо оценочно, можно полагать, что строительный сектор различных стран мира использует стальную металлопродукцию в пределах 10...30 % ее общего внутреннего потребления. Если исходить из этого показателя, можно полагать, что в настоящее время на ведущее место в мире по применению стали и стальной металлопродукции в промышленном и гражданском строительстве вышел Китай, который уверенно занимает первое место в мире по производству и потреблению стали. В 2003 г. внутреннее потребление стали в Китае превысило 257 млн т, что составляет почти треть ее общемирового потребления. Если считать, что в строительстве Китая в 2003 г. было израсходовано только 10...20 % общего потребления стали, то объемы завершенных в этом году стальных строительных конструкций и сооружений достигли 25...50 млн т.

✧ В современной строительной индустрии и при строительномонтажных работах базовой альтернативной технологией обработки и соединения заготовок и элементов металлических конструкций является сварка и родственные ей технологические процессы: разделительная резка, наплавка, нанесение специальных защитных покрытий и др. С малой долей погрешности все стальные строительные металлоконструкции можно считать сварными строительными конструкциями. Общие производственные затраты на сварку в строительной отрасли ведущих стран мира сопоставимы с аналогичными затратами в машиностроительных отраслях производства. Например, в США общие затраты собственно на сварку в строительстве составляли в 2000 г. более 11,3 млрд дол., что по абсолютной величине превышает затраты на сварку в ведущих промышленных отраслях США. В частности, в тяжелом машиностроении США они равны всего 7,6 млрд дол. или 67 % затрат на сварку в строительном секторе.

В строительстве находят применение практически все традиционные технологии дуговой электросварки плавлением и давлением. Естественно, что технологические процессы сварки для строительномонтажных условий на открытых площадках, на большой высоте, при резких колебаниях температуры окружающей среды обладают определенной адаптацией к этим условиям за счет специальной аппаратуры, техники сварки и соответствующих сварочно-технологических свойств сварочных материалов. В связи с расширением сортамента профильного и листового проката, а также новых марок сталей, используемых в строительстве, идет непрерывное совершенствование техники и технологий сварки, которые обеспечивают необходимые физико-механические свойства сварных швов и высокую эксплуатационную надежность

как сварных соединений, так и сварных стальных конструкций в целом.

Технологии разделительной резки аналогичны широко используемым в заготовительном производстве промышленных предприятий (в основном газокислородной и плазменно-дуговой). В последнее время начинает находить применение гидроабразивная резка высоколегированных сталей, металлополимеров и элементов комбинированных систем из разнородных материалов. Данный процесс отличает отсутствие зоны термического влияния, деформаций, а также высокое качество реза.

В условиях заводского изготовления габаритных заготовок и фрагментов строительных конструкций сварочное производство мало отличается от существующих на крупных машиностроительных или судостроительных предприятиях. В связи с расширением использования в строительных элементах сталей больших толщин (в частности, для сварки трудоемких в производстве двутавровых колонн и мостовых балок) в строительной индустрии появился спрос на сварочные роботизированные системы. Это позволяет производителям сварных конструкций решить проблему обеспечения высокого и стабильного качества сварных соединений, а также частично восполнить дефицит высококвалифицированных сварщиков.

Следует отметить, что увеличение объема строительномонтажных работ и объема применения сварки в строительстве сопровождается перетоком квалифицированных сварщиков из машиностроительных отраслей, где более интенсивно повышается уровень автоматизации и роботизации сварочных процессов, чем в строительстве. Наиболее заметно проявляется эта тенденция в США и Японии, где дефицит высококвалифицированного сварочного персонала имеет хронический характер.

✧ Производители и мировой рынок конструкционных материалов активно откликаются на растущий спрос строительства как емкого и перспективного потребителя конструкционных материалов. В первую очередь это относится к поставкам стали и стальной продукции — базового материала, сохраняющего свое значение на долгосрочную перспективу. Среди конструкционных материалов сталь обладает превосходным критерием «цена/качество», а также высокой экологичностью. Строительные конструкции из стали после исчерпания их эксплуатационного ресурса легко и сравнительно дешево в отличие от железобетона подвергаются рециклингу. Создавая новые марки сталей, в первую очередь, хорошо свариваемых низколегированных и микролегированных сталей повышенной и высокой прочности, металлургии в сотрудничестве со строителями решают актуальные проблемы снижения массы конструкций при одновременном повышении эксплуатационных нагрузок и надежности как элементов, так и конструкций в целом.

Наряду с увеличением объемов поставок, непрерывным повышением физико-механических и технологических показателей освоенных марок сталей и выпуском новых, металлургами совместно со строителями ведется большая работа по расширению, оптимизации и совершенствованию сор-



тамента листового и профильного проката. Возрастает производство и поставка строителям тонкого горячекатаного листа, в том числе из сталей повышенной прочности, а также длинномерного гофрированного листа с защитным покрытием и без него, тонколистовых гнутых профилей, а также прокатно-сварных многослойных пакетов (типа «сэндвич») для кровли и стеновых элементов и предназначенных для так называемых легких конструкций. В то же время металлурги осваивают выпуск для строителей толстого листа и специального толстолистового проката из хорошо свариваемых строительных сталей, в том числе высокопрочных. Сюда могут быть отнесены и нестандартные тяжелые профили таврового сечения для колонн, широкополосные и несимметричные прокатные и прокатно-сварные балки для мостов, мостовых переходов и перекрытий. В результате сотрудничества немецких и японских металлургов на строительный рынок начата поставка длинных фасонных листов «LP» различной геометрии с наибольшей разностью толщин 35...55 мм со скосами, выемками и уклонами (в сечении).

На предприятиях черной металлургии рентабелен выпуск стальных полуфабрикатов в виде компонентов строительных систем модульного типа, в частности, для тонкослойных перекрытий, комбинированных потолочных систем с ячеистыми фасонными балками для промышленных зданий, а также модульных стальных рам для быстрого монтажа несущего каркаса жилых зданий в массовом индивидуальном строительстве. Последняя продукция особое развитие получила в практике жилищного строительства в США и Австралии. Ее применение, как и индустриализация производства сварных конструкций, ведет к сокращению монтажа, объема сварочных работ в строительстве и повышению их качества.

✧ Повышение строительной активности сопровождается увеличением спроса и на сварочную технику, в частности на высокопроизводительные сварочные материалы и специализированное сварочное оборудование, учитывающее особенности выполнения сварочных работ на открытых площадках, в монтажных условиях и др. Мировой сварочный рынок чутко реагирует на повышенный спрос строительной отрасли. Возрастает поставки на рынок высокопроизводительных электродов с железным порошком в покрытии, с целлюлозным покрытием, электродов для вертикальной сварки

«сверху вниз», универсальных электродов для сварки во всех пространственных положениях, а также электродов для сварки низколегированных сталей повышенной прочности и специальных электродов для сварки легированных сталей. Учитывая требования строителей, увеличивается предложение новых марок сплошных и порошковых проволок для механизированной газоэлектрической сварки в заводских и монтажных условиях.

Структуру мирового рынка сварочной техники определяют объемы продаж двух его основных составляющих — рынка сварочных материалов (70 %) и рынка сварочного оборудования (30 %). Общая тенденция последних лет — снижение стоимостной доли сварочных материалов и повышение доли сварочного оборудования. Последнее связано с ростом цен на современное сварочное оборудование (как правило, с электронными системами управления и контроля), а также с развитием производства специализированного сварочного оборудования для новых прогрессивных технологий сварки, не требующих присадочных материалов и др. Именно рост объемов строительства и применения новых марок сталей и сортамента проката, а также новых конструктивных решений в промышленном и гражданском строительстве привели к увеличению сектора сварочного оборудования и повышенному спросу на инновационные технологии и оборудование для сварки в строительстве.

В соответствии с расчетами международного сообщества производителей эксперты известной в мире компании «Frost & Sullivan» прогнозируют рост объемов продаж сварочной аппаратуры для строительства от 1,5 в 2004 г. до 1,86 млрд дол. в 2010 г. На рис. 2 приведена информация об общем обороте от продаж сварочного оборудования и принадлежностей для строительства в 2003 г. и прогнозная оценка его роста до 2010 г. Кривая на этом же рисунке характеризует весьма умеренные темпы ежегодного прироста объема реализации этого оборудования, не превышающие 0,7...0,8 % и несколько уменьшающиеся к 2008...2010 гг.

Происходят изменения и на региональных рынках сварочного оборудования, в том числе и в секторе сварочного оборудования и принадлежностей непосредственно для сварки в строительстве. Так, промышленно развитые страны Северной Америки и Западной Европы до последнего времени потребляли значительное количество сварочного оборудования для строительства, однако, вследствие высокой степени насыщения предприятий строительного сектора таким оборудованием, дальнейшие перспективы достаточно негативны. На мировом рынке сварочного оборудования такое снижение спроса в определенной мере компенсируется растущим объемом продаж в странах Юго-Восточной Азии (прежде всего в Китае) и странах Восточной Европы, где наблюдается заметное увеличение промышленного и жилищного строительства. Общий прирост объема рынка сварочного оборудования для строительства, отчасти, следует отнести за счет роста на рынке доли Китая. Бурный экономический рост Китая, его сварочного про-

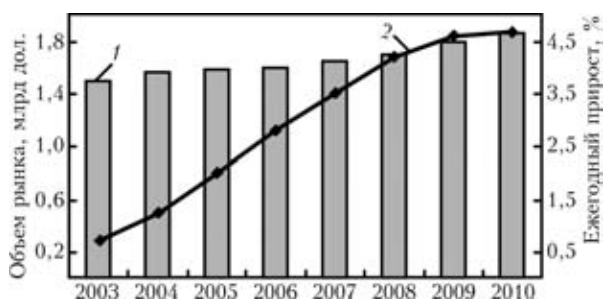


Рис. 2. Прогноз динамики мирового рынка сварочного оборудования и принадлежностей для строительства (Frost & Sullivan. Report B199): 1 — объем рынка; 2 — ежегодный прирост

изводства и индустрии сварочной техники сопровождается увеличением доли Китая в мировом рынке сварочного оборудования от 10 в 2003 г. до 19 % в 2010 г. После вступления Польши в ЕС ожидается увеличение объема производства ее промышленности, в том числе и в сварочной отрасли.

Невысокие темпы прироста объема рынка сварочного оборудования для сварки эксперты, отчасти, объясняют рядом причин. Строительное производство с его традициями отличает нечастое обновление сварочной аппаратуры, а также достаточно консервативное отношение к новым технологиям и техническим инновациям современных сварочных систем. Кроме того, растущая стоимость оборудования не всегда реально компенсирована повышением эффективности ее применения.

Рынок сварочного оборудования, несмотря на определенные трудности, в целом опирается на новейшие технические достижения, которые отвечают интересам непосредственных потребителей и интенсивно растущей сфере его применения. Например, в строительстве растут объемы применения в заводских и монтажных условиях механизиро-

ванной сварки сплошной и порошковой проволокой в защитных газах. При этом инновации в основном направлены на снижение массы и компактность источников сварочного тока и полуавтоматов, комплектацию оборудования интегрированными системами управления источниками питания и механизмами подачи проволоки. Для механизированной газоэлектрической сварки в строительномонтажных условиях на сварочный рынок начинают поступать специализированные инверторные источники питания. Характерно, что при газоэлектрической сварке с инверторными источниками питания могут быть снижены требования к квалификации сварщика, а сварка может вестись при любых погодных условиях без существенного ухудшения качества сварного шва.

По объемам продаж оборудование и материалы для механизированной (полуавтоматической) сварки в защитных газах и газовых смесях в строительстве уверенно вышли на второе место после оборудования, электродов и принадлежностей для ручной сварки.

In the paper modern civil engineering is presented as an independent sector in the economies of the world leading countries that is characterized by a growing application of steel metal products and welding equipment. Approximate scope of application of steel and steel metal products in the industrial and civil construction of several countries is evaluated. It is shown that welding and allied technologies are no-alternative processes of treatment and joining during fabrication and construction of steel building structures. Predicted tendencies of development of the sector of welding equipment in the world welding product market are outlined.

Поступила в редакцию 09.02.2005

## **ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

*14 июня 2005 г. в г. Шеффилде (Великобритания) состоится семинар «Изготовление конструкций из нержавеющей стали — оптимальные практические методы».*

*На семинаре предполагается обсудить основные принципы сварки нержавеющей стали, включая выбор техники и способов сварки, сварочных материалов и получения требуемых свойств соединений.*

*Организаторы: Британский институт сварки, Оутокумпу Стеинлес и Британская ассоциация нержавеющей стали (BSAA).*

За подробной информацией обращайтесь на сайт  
Британского института сварки или в BSAA  
(Элисон Мэрфи, тел. 0114 267 1260. E-mail: [enguizy@bssa.org.uk](mailto:enguizy@bssa.org.uk))  
[http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band\\_1/e14062005](http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/e14062005)



# ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ШИРОКОСЛОЙНАЯ НАПЛАВКА ЭЛЕКТРОДНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ И ЛЕНТАМИ (ОБЗОР)

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

Описаны основные способы высокопроизводительной широкослойной наплавки электродными проволоками и лентами. Рассмотрены их достоинства и недостатки. Приведены примеры промышленного применения.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, электрошлаковая наплавка лентами, электродные проволоки, электродные ленты, глубина проплавления, производительность наплавки

При выполнении наплавочных работ одной из главных задач является высокая производительность (по массе металла или по площади слоя, наплавляемых в единицу времени), которую можно повысить двумя путями: прямым, непосредственно увеличивая количественные показатели наплавки, или косвенным, уменьшая долю основного металла в наплавленном, тем самым, уменьшая количество наплавляемых слоев, необходимых для получения заданного состава наплавленного металла.

Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками или лентами позволяет решать задачу повышения производительности наплавочных работ обоими путями.

**Высокопроизводительная наплавка электродными проволоками.** Многоэлектродная наплавка (наплавка расщепленным электродом) производится одновременно двумя или более электродными проволоками с общим подводом сварочного тока. Способ обеспечивает высокую производительность процесса, снижение удельного тепловложения, уменьшение проплавления и коробления деталей. К числу недостатков многоэлектродной наплавки следует отнести сложность механизмов подачи большого количества электродных проволок. Наиболее просто проблема решается для двухэлектродной наплавки. В этом случае не требуется модернизации механизмов подачи стандартных наплавочных автоматов А-874Н, АД-231, А-1406 и т. п., используется только специальный мундштук для подачи двух проволок. При использовании трех и более электродных проволок требуются специальные механизмы подачи и мундштуки [1]. Кроме того, при многоэлектродной наплавке появляются сложности с размещением на наплавочной установке большого количества катушек с проволокой. Возникают некоторые трудности и в технологическом процессе, так как бухты наплавочной проволоки имеют разную массу и для замены одной из закончившихся бухт каждый раз требуется останавливать процесс наплавки.

Вследствие этих сложностей в промышленности наиболее широко используется двух- и реже трех-

электродная наплавка [2]. Известны конструкции оборудования, в которых использовали одновременно 15 электродных проволок [1]. При использовании двух электродных проволок диаметром 3,6 мм производительность наплавки достигает 14, 15 — 100 кг/ч. Доля основного металла в наплавленном составляет 20...25 % [1, 3]. Дополнительные возможности открывает подача в сварочную ванну порошкообразных присадочных материалов, которые уменьшают избыток теплоты в ванне и позволяют вести процесс на форсированных режимах, получать высокое качество металла, создавать необходимые композиции сплавов из исходных компонентов прямо на поверхности детали в ходе процесса наплавки. Регулировать состав наплавленного металла можно также путем подачи в общую ванну проволоки разных составов.

При многоэлектродной наплавке расстояние между осями электродов должно равняться 3...4 диаметрам. При большой ширине слоев (более 100 мм) и большом количестве электродов расстояние между ними вдоль фронта наплавляемого слоя рекомендуется изменять: по краям электроды располагают на расстоянии 1...2 диаметра, в центре — 3...4 [1]. При таком расположении электродов достигается хорошее формирование наплавленных слоев и гарантируется отсутствие несплавлений.

Важная особенность многоэлектродной наплавки с общим подводом тока — поочередное (импульсное) плавление электродов. При правильном выборе напряжения и скорости подачи электродных проволок в многоэлектродной системе происходит самопроизвольное импульсное плавление электродов без применения специальных устройств. Импульсное плавление электродов по фронту рассредоточивает тепловложение в основной металл и уменьшает глубину проплавления [1].

Дополнительные возможности открывает способ наплавки колеблющимся электродом [4], позволяющий гибко изменять ширину наплавляемого слоя от 12...15 до 120...140 мм, обеспечивая достаточно высокую производительность и хорошее формирование. Применяя наклон электрода вперед по отношению к наплавляемой поверхности в пределах 50...65° или высокие скорости колебаний (150...300 м/ч), достигается минимальное проплавление основного металла. Известны механизмы колебаний, позволяющие вести наплавку слоя об-

щей шириной до 300 мм с колебанием одновременно 2...4 электродов и регулируемым расстоянием между ними [5].

Для многоэлектродной наплавки могут применяться источники постоянного и переменного тока. Преимущества использования источника постоянного тока: высокая стабильность плавления электродов, уменьшение разбрызгивания и высокое качество наплавленного металла. Недостатки — повышенный расход электроэнергии и возможность появления магнитного дутья при ширине наплавленного слоя более 100 мм.

Преимущества использования источника переменного тока: хорошая стабильность плавления электродов и отсутствие магнитного дутья при ширине наплавленного слоя до 600 мм и выше, а также пониженный расход электроэнергии. Недостаток — хуже формирование наплавленного слоя.

**Дуговая наплавка порошковыми лентами.** Впервые использовать порошковые ленты для наплавки было предложено в ИЭС им. Е. О. Патона [6], который продолжает оставаться лидером в разработке и изготовлении этих наплавочных материалов. Способ отличается высокой производительностью (до 70 кг/ч при использовании двух лент сечением 3×45 мм [7]), относительно малым проплавлением (доля основного металла в наплавленном 15...30 %). Коэффициент заполнения порошковых лент достигает 70 %, т. е. с их помощью можно получить наплавленный металл с очень высокой степенью легирования, значительно большей, чем при наплавке порошковой проволокой. Порошковые ленты изготавливают на специальных станах, снабженных дозирующими устройствами и роликами для формирования, завальцовки ленты-оболочки и уплотнения шихты сформированной порошковой ленты. Процесс волочения при изготовлении порошковой ленты отсутствует, что делает производство достаточно дешевым.

Порошковые ленты для наплавки имеют толщину 3...4 мм и ширину 14...45 мм. Характерной особенностью большинства разработанных порошковых лент является их универсальность — они предназначены как для наплавки под флюсом, так и открытой дугой. Известен опыт наплавки порошковыми лентами в углекислом газе [8]. Наплавка порошковыми лентами обеспечивает достаточно высокую однородность наплавленного металла [9], хотя и несколько уступающую другим электродным материалам [10].

Автоматическую дуговую наплавку самозащитными порошковыми лентами наиболее широко применяют при изготовлении конусов и чаш доменных печей [11–13]. Для повышения производительности наплавку ведут одновременно двумя самозащитными лентами (на каждую из лент подается напряжение от отдельного источника питания) с поперечными колебаниями на ширину до 400 мм. С целью уменьшения количества трещин, расположенных вдоль образующей конуса и отрицательно влияющих на износостойкость наплавленного металла [14], наплавка выполняется непре-

рывно отдельными валиками, расположенными вдоль образующей, со смещением наплаваемой детали на шаг наплавки. Такой способ получил название «наплавка строчками» и в настоящее время является основным при наплавке деталей засыпных аппаратов. Смещение на шаг наплавки обеспечивает специальное устройство управления.

Промежуточный и защитный пояса конуса и чаши наплавляют порошковыми лентами ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2 и ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2С. Для наплавки контактного пояса наиболее широко применяются порошковые ленты ПЛ-Нп-500Х40Н40С2Р и ПЛ-Нп-400Х20Б7М6Н5В2Ф [12, 13]. Детали бесконусных загрузочных устройств доменных печей также наплавляют автоматически самозащитными порошковыми лентами ПЛ-Нп-450Х20Б7М6В2Ф, ПЛ-Нп500Х40Н40С2РЦ, ПЛ-Нп-550Х44Н34ГСР [15].

В ИЭС им. Е. О. Патона предложено производить наплавку листов малой толщины самозащитными порошковыми лентами ПЛ-АН101, ПЛ-АН171, ПЛ-АН179 и др., обеспечивающими получение слоев, которые обладают высокой износостойкостью в условиях абразивного и газоабразивного изнашивания [16]. Твердость наплавленного слоя составляет HRC 55...64. Разработанные оборудование и технологический процесс обеспечивают получение готовых листов с габаритными размерами 2600×1400 мм и наплавленной поверхностью 2500×1250 мм. Толщина основного металла может варьироваться в пределах 5...12, наплавленного слоя — в пределах 3...17 мм. Производительность наплавки достигает 25 кг/ч, глубина проплавления — до 4 мм.

Из износостойких биметаллических листов можно изготавливать бункеры, транспортеры, тетки, циклоны, дымососы, трубопроводы, кузова самосвалов и другие детали и конструкции, подверженные интенсивному абразивному изнашиванию.

Имеется опыт применения наплавки порошковой лентой ПЛ-АН150 ответственных деталей крупных энергетических и нефтехимических штамповарных задвижек Ду700, Ду1000, Ду1200 [17], а также деталей строительных и дорожных машин [7]. В последнем случае для наплавки использовали порошковую ленту ПЛ-У30Х30ГЗТЮ сечением 3×45 мм. Наплавка одной или двумя лентами обеспечивает получение за один проход наплавленного слоя шириной соответственно 50 или 100 мм. Производительность наплавки достигает 70 кг/ч.

**Дуговая наплавка спеченными лентами.** Технологии изготовления и применения спеченных (металлокерамических) лент в качестве электродных материалов для наплавки под флюсом были разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона и Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины [18]. Спеченные ленты на железной основе изготавливают методом порошковой металлургии путем холодной прокатки и последующего спекания в защитной атмосфере при температуре 1200...1300 °С смеси металлических порошков, ферросплавов, графита и других материалов с размерами частиц 70...200 мкм. Спеченные ленты имеют следующие характеристики: временное соп-



ротивление на разрыв не менее 60 МПа, пористость не более 30 %, плотность не ниже 6 г/см<sup>3</sup>. Спеченную ленту выпускают толщиной 1,0±0,2 мм и шириной 30... 100 мм (через 5 мм). Коэффициент наплавки 40... 45 г/(А·ч) (производительность до 30 кг/ч), доля основного металла в наплавленном не более 15 %. Наплавка спеченной лентой под флюсом обеспечивает отличное формирование наплавленного металла, хорошую отделимость шлаковой корки [19, 20].

Благодаря пористости спеченная лента обладает повышенным электросопротивлением, обуславливающим усиленный нагрев вылета электрода в процессе наплавки [21], что обеспечивает повышение производительности на 20... 30 % по сравнению с холоднокатаной лентой аналогичного сечения и состава. Равномерное распределение составляющих частиц шихты по сечению спеченной ленты способствует получению более однородного по химическому составу наплавленного металла, чем при использовании порошковой ленты, а это, в свою очередь, приводит к повышению его служебных характеристик [22, 23]. Еще одним достоинством спеченной ленты является возможность изготовления ее из особо чистых порошков.

Имеется опыт дуговой наплавки под флюсом двумя спеченными лентами, при этом одна является электродной, вторая — присадочной [24]. В этом случае практически вдвое увеличивается производительность наплавки и уменьшается проплавление, что позволяет получить требуемый состав наплавленного металла уже в первом слое.

В 1980-е годы производство спеченной электродной ленты достигало 600 т/год [25, 26]. Спеченную ленту ЛС-70ХЗМН использовали для наплавки подрессорных опор автомобилей КамАЗ [27]. На Калкоманском (Казахстан) и Брянском (Россия) заводах «Дормаш» лентами ЛС-У10Х7ГР и ЛС-70ХЗМН наплавливали ножи бульдозеров и грейдеров [28]. Череповецкий металлургический комбинат использовал до 100 т спеченной ленты для наплавки роликов рольгангов, барабанов моталок и т. д. [29].

**Дуговая наплавка холоднокатаными лентами.** Дуговую наплавку под флюсом холоднокатаной лентой впервые применили для наплавки лопастей гидротурбин [30, 31]. Использовали ленту из стали 10Х18Н9Т сечением 0,5×70 мм. И в дальнейшем дуговую наплавку холоднокатаными нержавеющей лентами широко использовали в промышленности [32]. Производительность наплавки в зависимости от режимов и размеров ленты составляет 10... 35 кг/ч, доля основного металла в наплавленном 10... 25 %. Чтобы получить в наплавленном металле нужные свойства приходится наплавливать два слоя и более. Этот способ применяли для нанесения коррозионноустойчивых слоев на детали оборудования атомных электростанций [33]. Наплавку проводили в два слоя под флюсом 48-ОФ-10. Первый слой наплавливали электродной лентой Св-07Х25Н13, второй — Св-04Х20Н10Г2Б. Суммарная толщина двух слоев 9... 11 мм. При наплавке внутренних поверхностей необходимо непрерывно удалять шлаковую корку, кроме того, для устра-

нения перегрева наплавливаемого изделия необходимо прерывать процесс наплавки, либо охлаждать наружную поверхность водой. Для устранения этих недостатков предложено применять двухзаходную наплавку, т. е. сначала наплавливать с определенным шагом отдельные валики, а вторым заходом заплавливать промежутки между ними. Этот способ наплавки использовали и для упрочнения рабочих поверхностей формующих барабанов в линии производства рулонных пластиков. В качестве наплавочных материалов применяли электродную нержавеющую ленту Св-20Х13 сечением 0,4×50 и 0,5×60 мм и флюс 48-ОФ-10. Твердость наплавленного металла во втором и последующих слоях *HRC* 40... 43 [34]. Высокопроизводительную дуговую наплавку под флюсом холоднокатаной лентой 08кп и т. п. используют для восстановления размеров различных деталей или в качестве подслоя при наплавке высоколегированных материалов.

В Приазовском государственном техническом университете разработан способ износостойкой дуговой наплавки холоднокатаной лентой из стали 08кп под легирующими керамическими флюсами [35-38]. Наплавку деталей, работающих в условиях трения металла по металлу при нормальных и повышенных температурах, циклических теплосменах, высоких контактных нагрузках (ролики МНЛЗ и т. п.), ведут под флюсом ЖСН-5. Для наплавки деталей, работающих в условиях циклических теплосмен, ударов и высоких удельных давлений (ножи горячей резки металла и т. п.), используется флюс ЖСН-6.

Для повышения производительности предлагалось вести наплавку при повышенном вылете электродной ленты [35]. С помощью нагрева вылета электрода проходящим током можно достичь прироста производительности в 1,5 раза. Так как для наплавки применяется тонкая лента, необходимую жесткость ей придают путем профилирования — отгиба краев. Профилирование ленты производится непосредственно в подающем механизме наплавочного автомата. Оптимальная форма отгиба краев ленты по радиусу позволила также улучшить качество формирования наплавленного металла.

Известен пример дуговой наплавки опорных валков прокатного стана электродной лентой из инструментальной стали 25Х5ФМС [39]. Производство этой ленты для собственных нужд было налажено на металлургическом комбинате «Северсталь».

Для дуговой наплавки холоднокатаными лентами под флюсом, как правило, применяются источники постоянного тока, что при использовании ленты шириной более 100 мм приводит к проявлению эффекта магнитного дутья, резко ухудшающего формирование наплавленного металла. С применением устройств, подавляющих этот эффект, можно использовать для наплавки ленты значительно большей ширины.

**Электрошлаковая наплавка лентами.** Как указывалось выше, при дуговой наплавке лентами выйти на необходимый состав наплавленного металла удается только во втором слое. Чтобы избежать этого недостатка предлагалось применять

для наплавки две ленты — электродную и присадочную [24, 40]. Патент австрийского изобретателя П. Шерля [41] предусматривал подачу двух или нескольких электродных лент, которые «плавятся в общей сварочной ванне благодаря образованию электрической дуги». Наиболее перспективным оказался процесс наплавки двумя параллельными лентами с определенным зазором [42]. Благодаря тому, что в зазор холодный флюс не попадает, жидкий шлак сильно нагревается и шунтирует ток, протекающий в лентах. По оценке авторов через шлак протекает около 60, а через дугу 40 % тока. Для лент шириной 60 мм рекомендуется зазор 8...10 мм. При наплавке двумя лентами 60×0,5 мм производительность достигает 26 кг/ч, доля основного металла в наплавленном не превышает 9 %. В 1970-х годах в ИЭС им. Е. О. Патона проведены эксперименты по переводу этого процесса полностью в электрошлаковый [43]. Наплавку вели двумя холоднокатаными (Св-08Х19Н10Г2Б) или спеченными (ЛС-07Х23Н12Г) лентами. Хорошие результаты получены при использовании флюсов АН-26П и 48-ОФ-10. Их применение позволило осуществить стабильный электрошлаковый процесс и получить отлично сформированные валики. Жидкий шлак под действием пинч-эффекта поднимается довольно высоко в зазоре между лентами. Нагрев и плавление лент происходит исключительно в результате теплопередачи от шлакового расплава. По сравнению со смешанным дугошлаковым процессом возрастают эффективность нагрева и производительность расплавления лент. Бездуговой характер процесса подтвержден данными осциллографа.

Большое влияние на процесс оказывает величина зазора. При слишком малом зазоре шлаковая ванна перегревается и кипит, появляется дуговой процесс. При большом увеличивается площадь зеркала шлаковой ванны, ее температура падает, возрастает сопротивление и процесс также переходит в дуговой. При малых мощностях процесс ведут при небольших зазорах, при больших — зазор увеличивают. При наплавке двумя спеченными лентами ЛС-07Х23Н12Г размерами 60×0,8 мм производительность составляла более 40 кг/ч, доля основного металла 5...8 %. Увеличение ширины ленты до 100 мм позволило достичь производительности более 60 кг/ч. Как и при дуговом процессе, при электрошлаковой наплавке лентами шириной более 100 мм проявляется эффект магнитного дутья, подавляя который можно производить наплавку лентами большей ширины.

Электрошлаковая наплавка лентами нашла основное применение в атомном и энергетическом машиностроении [44–48]. Для обеспечения высокой коррозионной стойкости материалов, контактирующих с теплоносителем первого контура АЭС, внутренние поверхности оборудования из низколегированных перлитных сталей (15Х2НМФА, 10Г2Н2МФА и др.) наплавляют слоем хромоникелевых аустенитных сталей. Как указывалось выше, при дуговой антикоррозионной наплавке лентами необходимо наплавливать два слоя. Для однослойной электрошлаковой наплавки разработана

холоднокатаная лента Св-03Х22Н11Г2Б, наплавка которой обеспечивает все необходимые антикоррозионные и механические свойства наплавленного металла [46, 47].

Были попытки использования электрошлакового процесса для наплавки спеченными лентами, обеспечивающими получение наплавленного металла типа углеродистых износостойких сталей [49, 50]. При содержании в ленте до 0,1 % углерода электрошлаковый процесс был стабильным и устойчивым. При более высоком содержании углерода процесс перемежается с дуговым. При неизменном содержании в ленте раскислителей (марганца и кремния) с увеличением содержания углерода в сварочной ванне происходит интенсивное его окисление с выделением большого количества СО. Это вызывает интенсивное кипение ванны и нарушение электрошлакового процесса. Окисление углерода усиливается при наличии в шлаке больших количеств FeO, MnO, SiO<sub>2</sub>. Этим объясняется менее стабильный процесс наплавки под высококремнистыми флюсами. При легировании лент сильными раскислителями процесс наплавки удается стабилизировать и в этом случае можно вести электрошлаковую наплавку спеченными лентами ЛС-5Х4В3Ф и ЛС-45Х4В2М2ФС, содержащими до 0,5 % углерода.

Небольшая доля основного металла в наплавленном при электрошлаковой наплавке лентами позволяет уменьшить количество наплавливаемых слоев, что снижает деформации, склонность наплавленного металла к образованию трещин и трудоемкость наплавки.

Таким образом, в настоящее время разработаны и с успехом опробованы в промышленном производстве ряд высокопроизводительных способов широкоугольной наплавки электродными проволоками и лентами. Разнообразие способов наплавки позволяет заводскому специалисту выбрать из них наиболее рациональный, исходя из имеющихся на рынке оборудования и наплавочных материалов, с учетом их доступности и цены.

1. Меликов В. В. Многоэлектродная наплавка. — М.: Машиностроение, 1988. — 144 с.
2. Наплавка роликов машин непрерывного литья заготовок / В. Л. Маликин, Л. И. Опарин, П. В. Гладкий и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — С. 22–23.
3. Меликов В. В. Многоэлектродная наплавка и некоторые ее возможности // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы. — Киев—Коммунарск: ИЭС им. Е. О. Патона, 1973. — С. 9–14.
4. Юзвенко Ю. А., Кирилук Г. А. Наплавка порошковой проволокой. — М.: Машиностроение, 1973. — 46 с.
5. Установки для механизированной наплавки с поперечными колебаниями электрода / В. В. Левин, М. М. Шель, В. Н. Асалханов, Ю. П. Нестерец // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 38–42.
6. Юзвенко Ю. А. Порошковая лента // Автомат. сварка. — 1970. — № 2. — С. 23–26.
7. Кузнецов Л. Д., Кортелев Г. А., Николаенко М. Р. Особенности процесса наплавки порошковой лентой на форсированных режимах деталей строительных и дорожных машин // Теоретические и технологические основы наплавки. Современные способы наплавки и их применение. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 12–15.

8. Пацкевич И. Р., Соловской В. М., Хейфец Л. А. Опыт применения и перспективы развития наплавки порошковой лентой // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы. — Киев—Коммунарск: ИЭС им. Е. О. Патона, 1973. — С. 14—18.
9. Юзвенко Ю. А., Горпинок Б. Н., Шимановский В. П. Химическая макронеоднородность металла, наплавленного открытой дугой порошковой лентой // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — С. 21—29.
10. Химическая макронеоднородность металла, наплавленного различными электродными материалами // В. Е. Еремеев, Ю. В. Стреляный, В. А. Корбут, Л. В. Песня // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 36—42.
11. Юзвенко Ю. А., Шимановский В. П., Гавриш В. А. Дуговая наплавка засыпного аппарата доменной печи // Автомат. сварка. — 1972. — № 2. — С. 59—64.
12. Шимановский В. П., Данильченко Б. В., Ворончук А. П. Наплавка деталей засыпного аппарата доменных печей // Теоретические и технологические основы наплавки. Современные способы наплавки и их применение. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 35—40.
13. Шимановский В. П., Ворончук А. П., Звездин С. М. Материалы и оборудование для наплавки конусов и чаш доменных печей // Оборудование и материалы для наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 71—73.
14. Шимановский В. П., Юзвенко Ю. А. Влияние трещин на газообразный износ наплавленного металла // Автомат. сварка. — 1971. — № 2. — С. 61—62.
15. Наплавка при изготовлении современных грузозачерпывающих устройств доменных печей // С. Я. Шехтер, В. В. Пьянков, Ю. Н. Лазаренко, Ю. М. Кобзев // Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 30—34.
16. Данильченко Б. В., Шимановский В. П., Терпило В. Н. Техника и технология высокопроизводительной наплавки листов малой толщины износостойкими сплавами // Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 5—9.
17. Еремеев В. Б., Стреляный Ю. В., Лопухов Ю. И. Наплавка порошковой лентой седел крупных штамповочных задвижек // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 132—136.
18. Опарин Л. И., Фрумин И. И., Отрок А. И. Механизированная наплавка слоя инструментальной стали металлокерамической лентой // Автомат. сварка. — 1968. — № 12. — С. 58—61.
19. Маликин В. Л., Опарин Л. И. Влияние режима наплавки спеченной электродной лентой на производительность процесса и формирование наплавленного слоя // Там же. — 1981. — № 5. — С. 45—47.
20. Маликин В. Л., Опарин Л. И., Фортунатова Н. Н. Производительность процесса и геометрические размеры наплавленных валков при электродуговой и электрошлаковой наплавке спеченными электродными лентами // Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 110—115.
21. Фрумин И. И., Опарин Л. И., Маликин В. Л. Новые металлокерамические ленты для механизированной наплавки под флюсом специальных сталей и сплавов // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы. — Киев—Коммунарск: ИЭС им. Е. О. Патона, 1973. — С. 59—66.
22. Исследование эксплуатационных свойств износостойкого металла, наплавленного спеченными электродными лентами // В. Л. Маликин, И. И. Фрумин, Л. И. Опарин, В. И. Буслов // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 99—102.
23. Маликин В. Л., Фрумин И. И., Сацункевич В. Д. Влияние химической однородности наплавленного металла на сопротивление термической усталости // Автомат. сварка. — 1982. — № 11. — С. 12—14.
24. Маликин В. Л., Опарин Л. И. Повышение производительности наплавки ленточным электродом // Там же. — 1974. — № 8. — С. 58—60.
25. Опарин Л. И. Некоторые итоги и перспективы применения наплавки спеченными электродными лентами // Там же. — 1981. — № 8. — С. 61—64.
26. Опарин Л. И., Маликин В. Л. Применение износостойкой наплавки спеченными электродными лентами // Наплавка. Опыт и эффективность применения. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 33—35.
27. Повышение износостойкости поддрессорных опор грузового автомобиля КамАЗ наплавкой спеченной электродной лентой // Л. И. Опарин, И. И. Фрумин, В. Л. Маликин и др. // Автомат. сварка. — 1980. — № 3. — С. 36—37.
28. Износостойкая наплавка ножей дорожно-строительных машин спеченной электродной лентой // Л. И. Опарин, В. Л. Маликин, А. Г. Акимова, Г. И. Усольцева // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 84—86.
29. Опарин Л. И., Маликин В. Л. Применение износостойкой наплавки спеченными электродными лентами // Наплавка. Опыт и эффективность применения. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 33—35.
30. Хомусько Ф. А. Автоматическая наплавка ленточным электродом // Автомат. сварка. — 1957. — № 5. — С. 71—77.
31. Хомусько Ф. А., Работнов Б. А. Автоматическая наплавка лопастей поворотлопастных гидротурбин электродной лентой под флюсом // Там же. — 1957. — № 5. — С. 62—71.
32. Крайцов Т. Г. Электродуговая наплавка электродной лентой. — М.: Машиностроение, 1978. — 168 с.
33. Белов Ю. М., Трофимов И. Ф., Евтушенко А. С. Совершенствование технологии механизированной наплавки оборудования АЭС // Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 5—9.
34. Наплавка лентой крупногабаритных тонкостенных формулирующих барабанов // Ю. М. Белов, П. И. Сморгачев, Н. И. Пряник, Н. В. Василисин // Теоретические и технологические основы наплавки. Современные способы наплавки и их применение. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 3—7.
35. Лецинский Л. К., Тарасов В. В., Белоусов Ю. В. Нагрев влета электродной ленты расплавленным шлаком // Автомат. сварка. — 1973. — № 2. — С. 71—72.
36. Белоусов Ю. В., Балянский К. В., Лецинский Л. К. Особенности формирования металла при дуговой наплавке электродной лентой // Свароч. пр-во. — 1974. — № 12. — С. 32—34.
37. Белоусов Ю. В., Лецинский Л. К. Основные особенности наплавки профилированным ленточным электродом // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — С. 35—44.
38. Лецинский Л. К., Белоусов Ю. В., Матвиенко В. Н. Повышение производительности и качества широкослесной наплавки ленточным электродом // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 15—19.
39. Увеличение срока службы опорных валков стана 2000 горячего проката полос в ОАО «Северсталь» // Л. И. Данилов, Н. Б. Скорохватов, В. Ф. Соболев и др. // Черная металлургия. Бюл. НТИЭИ. — 2004. — № 8. — С. 68—69.
40. Pat. № 3271554 USA. Overlay welding / W. C. Johnson. — Заявл. 24.06.65. — Опубл. 06.09.66.
41. Pat. 313026. Lichtbogen-Schmelzschweißverfahren / Scherl P. — Заявл. 24.12.69. — Опубл. 25.01.74.
42. Neff F., Scerl P., Ornig H. Neue Verfahren zum Schweißsplattieren dickwandiger stahlbleche und behälter // Schweisstechnik. — 1974. — № 7. — S. 139—146.
43. Разработка процесса и исследование некоторых технологических особенностей электрошлаковой наплавки лентами // И. И. Фрумин, В. К. Каленский, Ю. А. Панчишин и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — С. 83—88.
44. Фрумин И. И. Наплавка в атомном энергомашиностроении // Автомат. сварка. — 1975. — № 10. — С. 21—24.
45. Применение электрошлаковой наплавки спеченными лентами для изготовления двухслойных листовых заготовок // В. К. Каленский, Ю. А. Панчишин, С. Я. Шехтер, Ю. Н. Пятков // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 89—93.
46. Исследование процесса электрошлаковой антикоррозионной наплавки двумя ленточными электродами // В. А. Иг-





- натов, В. В. Мурзин, Э. А. Рохлин, Л. В. Хачатурьянц // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 101–106.
47. *Исследование* антикоррозионного слоя, наплавленного лентами двухэлектродным способом на сталь 15Х2НМФА / А. В. Залинов, А. Е. Рунов, Е. Г. Старченко и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 106–112.
48. *Каленский В. К., Панчишин Ю. А.* Об эффективности антикоррозионной наплавки электродными лентами // Наплавка. Опыт и эффективность применения. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 35–40.
49. *Маликин В. Л., Опарин Л. И.* Электрошлаковая наплавка некоторых износостойких сталей спеченными электродными лентами // Теоретич. и технологич. основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — С. 96–102.
50. *Маликин В. Л.* Разработка материалов и технологии износостойкой электрошлаковой наплавки спеченными электродными лентами // Теоретич. и технологич. основы наплавки. Современные способы наплавки и их применение. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 77–84.

Main methods of high-efficiency wide-band surfacing using electrode wires and strips are described. Their advantages and drawbacks are shown. Examples of industrial application are given

Поступила в редакцию 02.03.2005

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ПО ШВУ И СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ RASTR ДЛЯ ЭЛС

*Предполагается принцип получения информации о состоянии поверхности изделия путем сканирования с помощью зонда — острогофокусированного электронного луча.*

*При той же стоимости основными преимуществами системы RASTR по сравнению с оптическими и телевизионными системами являются отсутствие оптических осветителей, которые запыляются парами металла, и лучшие условия для работы оператора.*



**Принцип работы.** Изображение размером 60×60 мм со швом, сварочной ванны и стыком формируется три раза в секунду при сканировании луча по поверхности детали в течение короткого периода времени. Процесс ЭЛС не исключает возможности его прерывания на этот короткий период времени  $\tau_{пр} = 0,1(d/v_{св})$ , где  $d$  — диаметр луча;  $v_{св}$  — скорость сварки. Для  $d = 1$  мм (размер луча, типичный для мощных пушек) при  $v_{св} = 6$  м/ч (1,7 мм/с) прерывания процесса на  $\tau_{пр} < 60$  мс не вызывают никаких возмущений при образовании шва. При  $v_{св} = 60$  м/ч (17 мм/с) это время сокращается до 6 мс. В течение этих периодов сварочный луч может переключаться в режим зондирования, стык, ванна и шов в непосредственной близости от ванны могут быть визуализированы. Система автоматически вычисляет величину отклонения шва и с помощью механизмов или системы отклонения совмещает луч с линией стыка.

### Технические характеристики системы

Количество выборок, пиксел..... 256×256  
 Динамическая ошибка при слежении по шву, мм ..... ±0,1

*Система работает с блоками питания типа ELA мощностью 15, 60 и 120 кВт.*

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 57  
 Тел./факс: (38044) 525 43 19  
 E-mail: nazarenko@technobeam.com.ua



## НАПЛАВКА ГРЕБНЕЙ ВАГОННЫХ КОЛЕС ПОСЛЕ ОТЖИГА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ НА ВАГОНОРЕМОНТНЫХ ЗАВОДАХ УКРАИНЫ

**В. В. МАТВЕЕВ**, директор ЗАО «Вилтранс»

Рассмотрены особенности износа железнодорожных колес и применяемые технологии восстановления наплавкой их гребней. Описан опыт по восстановлению гребней колес после отжига поверхности катания. Отмечены преимущества такой технологии.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, вагонные колеса, поверхность катания, высокочастотный отжиг, твердость, микроструктура, повышение производительности

При торможении на поверхности катания колес в результате появления пластических деформаций возникает ряд дефектов: выдавливание металла на периферию поверхности катания, расслоение металла, трещины, повреждения усталостного характера в зоне контакта колеса с рельсом [1]. В 60...70 % случаев такие дефекты, как ползуны, выщербины, навары на поверхности катания, являются причиной отцепок грузовых вагонов для текущего ремонта колесных пар (КП). Основной причиной наблюдаемого в 1990-е годы увеличения количества колес с дефектами контактно-усталостного происхождения является снижение качества металла колес, изготовленных на металлургических заводах [2]. В процессе эксплуатации дефекты могут распространяться на глубину 20 мм и более в область растягивающих напряжений в колесе, этому способствуют, в частности, ударные нагрузки. Зарождение трещин возможно на глубине 15...20 мм от поверхности катания в местах залегания дефектов металлургического происхождения металла колес, которые развиваются под действием циклических нагрузок. Такие дефекты обычно распространяются параллельно поверхности катания и заканчиваются на наружной поверхности гребня. Развитие трещины металла участка гребня может привести к отколу металла длиной до 200...250 мм и потере направляющих функций колеса. Наличие неметаллических включений в колесной стали и ее пониженная деформационная способность также могут быть причиной появления трещин в дисках колес [3]. Дефекты усталостного происхождения характеризуются небольшими микротрещинами, распространяющимися приблизительно на 10 мм вглубь металла от поверхности катания и у основания гребня. Эти микротрещины ориентированы под углом 45° относительно направления катания и обычно не развиваются до опасных размеров. В целом в результате воздействия ударных нагрузок, проникновения водорода в сталь в условиях повышенной влажности может происходить снижение поверхностной и усталост-

ной прочности, пластичности, ударной вязкости и выносливости [4].

Для восстановления одного миллиметра изношенного гребня вагонных колес (получение стандартного профиля с шириной гребня 33 мм на расстоянии 18 мм от его вершины) необходимо уменьшить толщину обода на 2 мм. С целью сохранения толщины обода после обточки вагонных колес на предприятиях железнодорожного транспорта стран СНГ, в частности Украины, Германии, Чехии, Болгарии, Польши, Индии, Швеции и др. применяют технологию дуговой наплавки изношенных гребней под флюсом [5, 6].

Согласно технической документации на наплавку гребней допускаются колеса после полного устранения дефектов обточкой. Колеса с упрочненной поверхностью катания (с наклепом и ползунами) подвергают механической обработке, при этом стачивается («срезается») 2...3 мм металла с обода колеса. В настоящее время практически все колеса, поступающие в ремонт, имеют по 2...3 ползуна глубиной не более 2 мм, около 25 % колес имеют ползуны с твердостью металла поверхности катания более  $HRC\ 50$ . В последние годы для уменьшения толщины снимаемой стружки перед обточкой рекомендуется использовать поверхностный отжиг поверхности катания, упрочненной в процессе эксплуатации [7].

Целью настоящей работы является обобщение опыта наплавки гребней вагонных колес после отжига поверхности катания, накопленного ЗАО «Вилтранс» на предприятиях Украины. Использование отжига перед наплавкой изношенной поверхности катания колес [8] впервые предложено нами к внедрению на участках наплавки ЗАО «Вилтранс» на ряде вагоноремонтных заводов Украины.

Многочисленный импульсный отжиг поверхностного слоя металла обода и гребня колес осуществлялся на установках ТИ2-100/10М, изготовленных ЗАО «Вилтранс». Поверхностный индукционный отжиг осуществляется токами с частотой 10 кГц на вращающемся колесе путем нагрева со скоростью 150...160 °С/с до температуры выше  $A_{c1}$  ( $810 \pm 20$  °С), охлаждения до температуры ниже точки  $A_{r1}$  ( $630 \pm 20$  °С) в течение 5...6 с, повторного

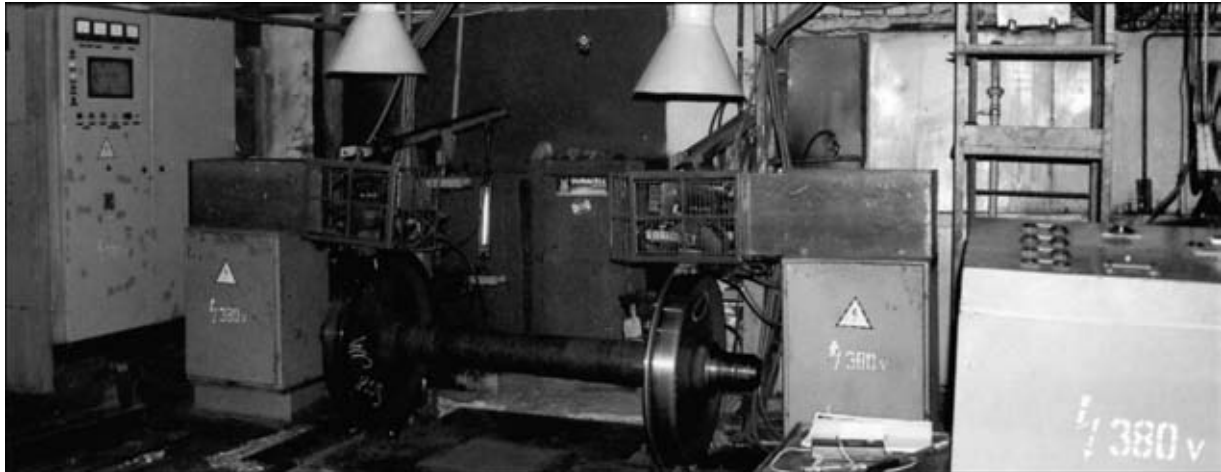


Рис. 1. Индукционная установка ТИ2-100/10М для отжига поверхности катания вагонных колес

нагрева в течение 5...6 с до температуры ниже точки  $A_{c_1}$  ( $680 \pm 20^\circ\text{C}$ ) и свободного охлаждения. Критическая точка  $A_{c_1}$  стали 60Г, близкой по своим свойствам к типичной колесной стали, составляет  $730^\circ\text{C}$ . Режимы многократного импульсного отжига соответствовали рекомендациям, предложенным в работе [9].

Установка ТИ2-100/10М (рис. 1) состоит из двух нагревательных постов, механизма перемещения индукторов, механизма вращения КП, системы охлаждения, источника питания (генератор СЧГ9-100/10 мощностью 100 кВт). Нагревательный пост состоит из индуктора-трансформатора и блока конденсаторов. Индуктор-трансформатор предназначен для создания двух узких пятен индукционного нагрева, создающих возможность реализации необходимых параметров нагрева и охлаждения. Он сварен из медной трубки, согнутой по профилю колеса, с припаянными к ней радиаторными пластинами. Промежутки заполнены пластинами из электротехнической стали, образующими магнитопровод. К концам трубки приварены медные плиты, образующие фланец для крепления индуктора к трансформатору. Индуктор-трансформатор и генератор выполнены водоохлаждаемыми. Система охлаждения является оригинальной и содержит двухсекционный бак для дистиллированной воды (конденсата) с внутренней перегородкой, два насоса и два калорифера. Вращение колес обеспечивается с помощью двигателя переменного тока и редуктора. Линейная скорость вращения КП составляет 20 мм/с.

Проведены металлографические исследования образца колеса (рис. 2) с изношенной поверхностью катания на ободе и гребне, дефектами на поверхности обода (ползун, трещина), следами термического воздействия при торможении на гребне. Анализ структуры образцов проводили в Институте электросварки им. Е. О. Патона после их травления в растворе хлорного железа с последующим осветлением в растворе персульфата аммония (макроструктуры), после химического травления в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты (микроструктуры). Твердость металла по Роквеллу измеряли на приборе ТК-2М, микротвердость по

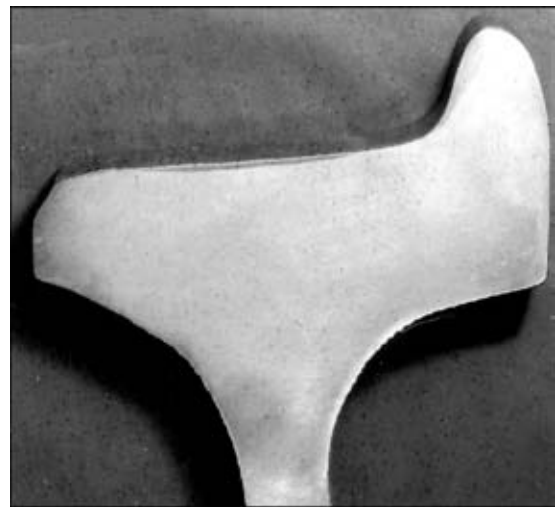


Рис. 2. Макрошлиф фрагмента колеса с изношенной поверхностью катания

Виккерсу — на приборе М-400 фирмы «Леко» при нагрузке 100 г.

Макроструктура образца свидетельствует, что в верхней части гребня протравленная полоса достигает 4...5 мм по глубине ( $HRC\ 24...25$ ). Микроструктура металла гребня колеса в зоне термического воздействия от проскальзывания о головку рельса представляет собой бейнит (рис. 3, а). Микротвердость металла в приповерхностной зоне составляет  $HV1-3080...3060$  МПа, в зоне термического воздействия  $HV1-2850...2970$  МПа, в основном металле (вдали от зоны термического воздействия)  $HV1-2740...2850$  МПа. На рис. 3, б приведена микроструктура металла обода колеса с ползуном. При увеличении ( $\times 1000$ ) установлено, что микроструктура приповерхностного (светлый слой на рис. 3, б с толщиной 0,8...1,0 мм) состоит преимущественно из мартенсита (рис. 3, в) с твердостью  $HV1-6400...6800$  МПа. Кроме игольчатой мартенситной структуры, наблюдаются темные участки зернистого бейнита с твердостью  $HV1-3660...4010$  МПа. Далее по глубине (рис. 3, б) следует серый слой толщиной 0,5...0,6 мм, структура которого (рис. 3, з) состоит преимущественно из зернистого бейнита с твердостью  $HV1-3090...3390$  МПа и крупных светлых участков с

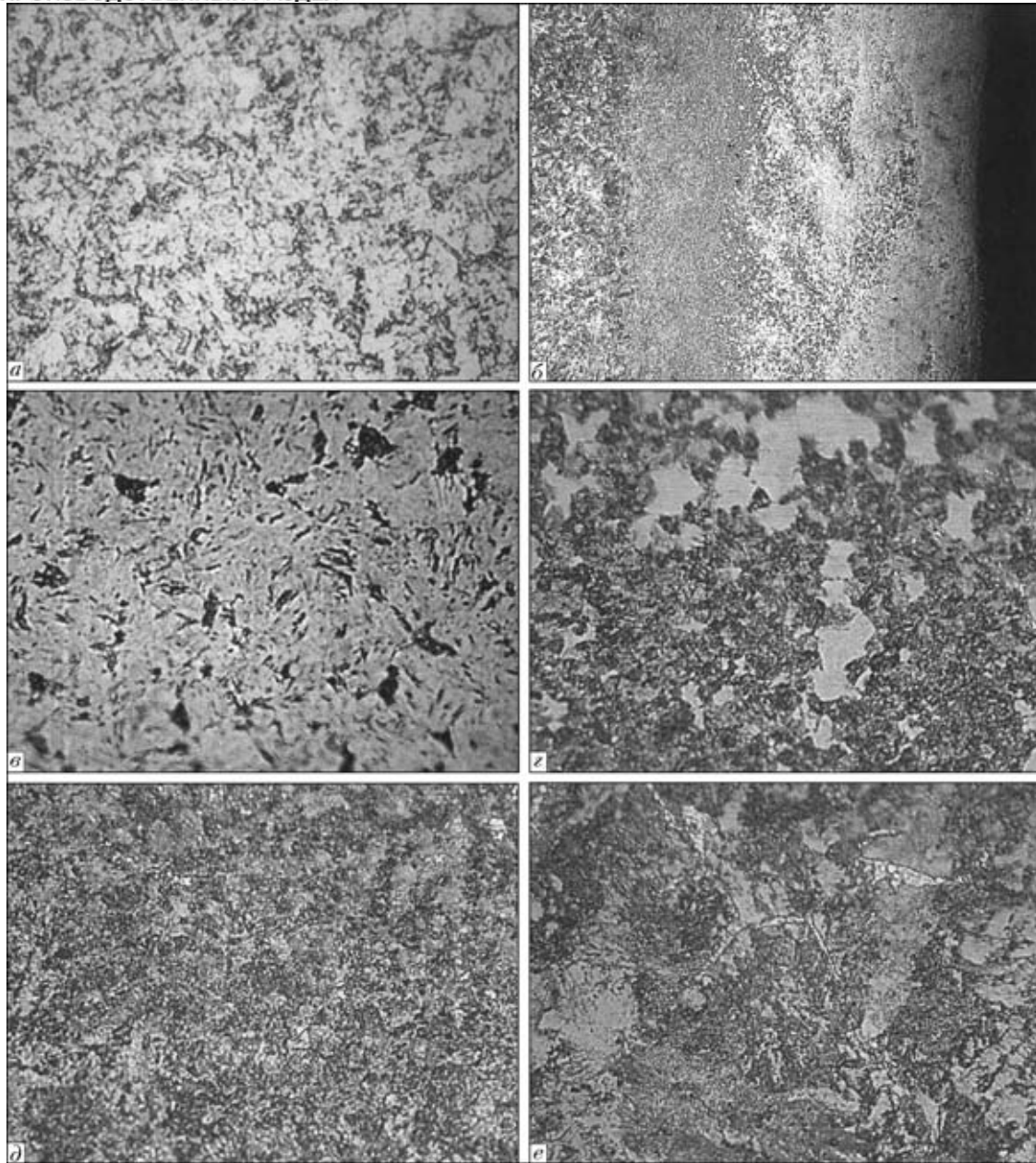


Рис. 3. Микроструктура металла в различных поверхностных участках колеса: *a* — 3ТВ гребня,  $\times 1000$ ; *b* — обода колеса,  $\times 40$ ; *c* — приповерхностный светлый слой обода,  $\times 1000$ ; *d* — приповерхностный первый серый слой,  $\times 100$ ; *e* — основной металл колеса,  $\times 1000$



Рис. 4. Микроструктура металла поверхностных участков обода колеса после ТВЧ отжига,  $\times 40$

твердостью  $HV1-4640...6650$  МПа. Далее по удалению от поверхности наблюдается второй серый слой (рис. 3, *b*) толщиной  $0,5...0,6$  мм. Его структура — зернистый бейнит (рис. 3, *d*) с микротвердостью  $HV1-3250$  МПа. За ним следует собственно металл колеса, структура которого состоит из сорбитообразного перлита (рис. 3, *e*) с микротвердостью  $HV1-2540...2560$  МПа и тонких прослоек феррита. На полированной нетравленной поверхности образца колеса с ползуном обнаружены светло-серые включения, вытянутые в направлении деформации (микротвердость  $HV1-2570$  МПа), которые идентифицированы как сульфиды. Кроме них наблюдаются отдельные включения сложного состава с высокой твердостью  $HV1-7400$  МПа.

Сопоставление микроструктуры металла обода колеса до (рис. 3) и после ТВЧ отжига поверхности катания (рис. 4) позволило заключить, что:

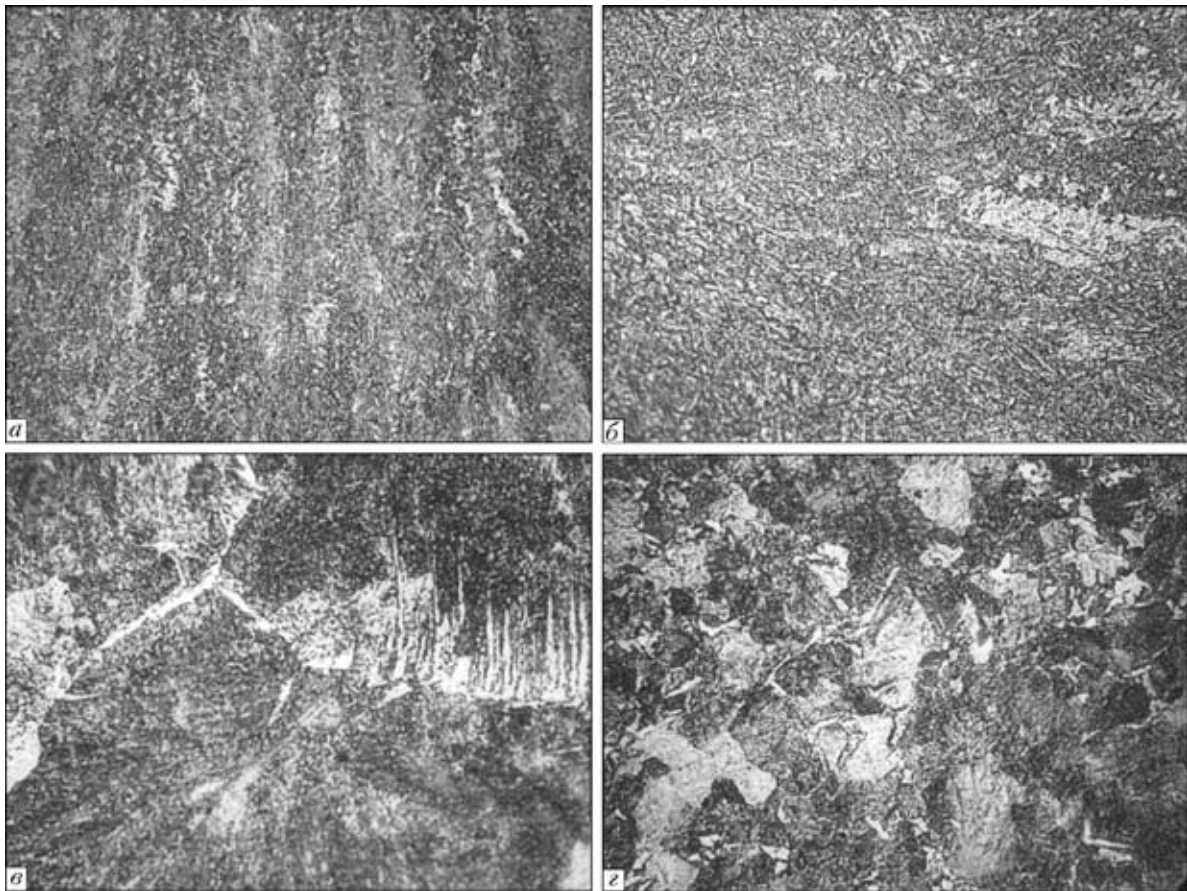


Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла гребней и ЗТВ: *а* — верхний слой наплавленного металла гребня,  $\times 200$ ; *б* — промежуточный (перекристаллизованный) слой наплавленного металла,  $\times 200$ ; *в* — участок крупного зерна в ЗТВ металла гребня после выполнения однопроходной наплавки,  $\times 1000$ ; *г* — участок перекристаллизации металла многопроходной наплавки,  $\times 1000$

микроструктура металла в зоне со структурой игольчатого мартенсита (твердость  $HV$  6400...6800 МПа), а также участка со структурой зернистого бейнита (твердость  $HV_1$ —3660...4010 МПа) после ТВЧ отжига претерпевает превращение с образованием мелкозернистого бейнита с твердостью около  $HV_1$ —2970...3090 МПа на глубине до 2,4 мм от поверхности катания;

после ТВЧ отжига структура приповерхностного слоя колеса становится более однородной;

влияние ТВЧ отжига на структуру по глубине ограничено (микроструктура и микротвердость на глубине, превышающей 2,4 мм, практически не изменяются).

Таким образом, поверхностный отжиг перед наплавкой способствует превращению в этой зоне мартенситной структуры в бейнитную, измельчению зерна, что обеспечивает уменьшение вероятности образования холодных трещин при наплавке. При этом отжиг изменяет уровень остаточных напряжений в ободе колеса, возникающих при закалке, увеличивает уровень растягивающих напряжений в нем. Последнее способствует вскрытию дефектов (микротрещин) на поверхности колес до выявляемых размеров. Расходимость концов колес с поверхностью катания колес после отжига и разрезания составляет +1 мм. Согласно п.1.9 ГОСТ 10791-89 «Колеса цельнокатанные» и ISO 1005/6 сходимость концов обода колеса после радиальной

разрезки (в состоянии поставки) должна быть не менее 1 мм, расходимость не допускается.

Одноэлектродная многослойная наплавка под флюсом АН-348АМ гребня (после поверхностного отжига) сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм (скорость наплавки 26...28 м/ч) не вызывает образования холодных трещин в металле ЗТВ.

Твердость по Роквеллу наплавленного металла гребня изменяется от  $HRC$  31 в металле верхнего слоя до  $HRC$  21...23 в нижележащих валиках. Микротвердость металла ЗТВ гребней под нижними и центральными слоями наплавки составляет  $HV_1$  — 3220...3090 МПа, под верхними  $HV_1$  — 2740...3510 МПа. Обработка данных технологических карт процесса наплавки гребней вагонных колес после отжига упрочненного металла поверхности катания показывает, что твердость поверхности катания снижается почти в 2 раза. После обточки обода, наплавки гребня, остывания колеса в термостате и обточки наплавленного слоя по профилю (средняя скорость охлаждения не более  $50$  °С/ч) твердость металла поверхности катания колес повышается и становится не ниже твердости основного металла.

На рис. 6 приведена последовательность ремонта колес с наплавкой гребней после отжига поверхности катания на примере Дарницкого участка наплавки гребней ЗАО «Вилтранс» в дей-



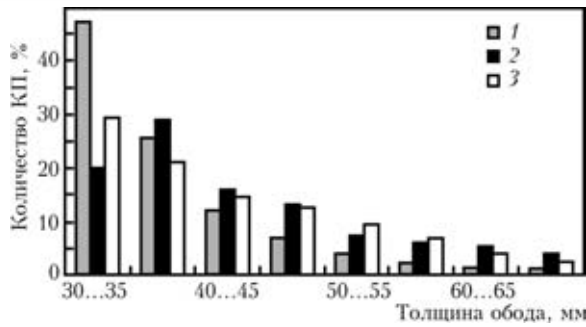


Рис. 8. Распределение КП, поступивших на участки наплавки гребней, в зависимости от толщины обода: 1 – ДВРЗ; 2 – ПВРЗ; 3 – СВРЗ

отжига и тремя установками для наплавки — восстановление до 60 колес за 8-часовую смену.

В настоящее время после заводского ремонта колес допускается толщина обода не менее 27, после ремонта в депо — не менее 25 мм. Соответственно в ремонт без отжига принимаются колеса с толщиной обода не менее 35 и 30 мм. После отжига поверхности катания перед наплавкой гребней в ряде случаев стала возможной обточка колес соответственно с толщиной обода 29 и 26 мм. Поэтому технология ремонта с использованием отжига перед наплавкой гребней особенно актуальна, когда в ремонт на заводы приходят вагоны с «тонкими» колесами. На рис. 8 представлено распределение 13445 КП, поступивших на наплавку гребней с июня по декабрь 2003 г. (ДВРЗ – 4292, ПВРЗ – 4270, СВРЗ – 4883), по толщине обода.

Отжиг поверхности катания перед наплавкой гребней проводили согласно «Технологической инструкции по индукционному отжигу поверхности катания колесных пар предприятиями по ремонту подвижного состава железных дорог Украины», введенной Указом Укрзалізниці за № 208-Ц от 7 июня 2000 г. На технологический процесс наплавки гребней колес грузовых вагонов на установках УНГ с предварительным отжигом поверхности катания ПП НТЦ «СЕПРОЗ» Украины выдан сертификат соответствия № UA1/012/0096713-04.

С мая 1996 по 31.12.2004 гг. ЗАО «Вилтранс» на ДВРЗ, СВРЗ, ПВРЗ и в УГЦ «Укрспецвагон» выполнен отжиг поверхности катания 215178 КП и наплавка 256327 гребней вагонных колес. За этот период ни одной рекламации с дорог после эксплуатации колес, касающейся наплавки гребней с отжигом поверхности катания, на эти заводы не поступило.

Изучены возможности наплавки гребня двумя электродными проволоками в общую сварочную ванну от одного источника питания после ТВЧ отжига поверхности катания колес. При этом два электрода располагались на расстоянии 4 мм друг от друга с подключением к одному источнику питания (ВДУ-1600). Средние значения режима сварки:  $I_{св} = 550$  А,  $v_{нап} = 28...30$  м/ч. Ожидалось, что расход электроэнергии, сварочных материалов и трудозатрат на 1 кг наплавленного металла снизится по сравнению с одноэлектродной сваркой [10]. Эксперименты показали, что при двухэлектродной наплавке достигается более качественное формирование наплавленного слоя и на 30...40 %

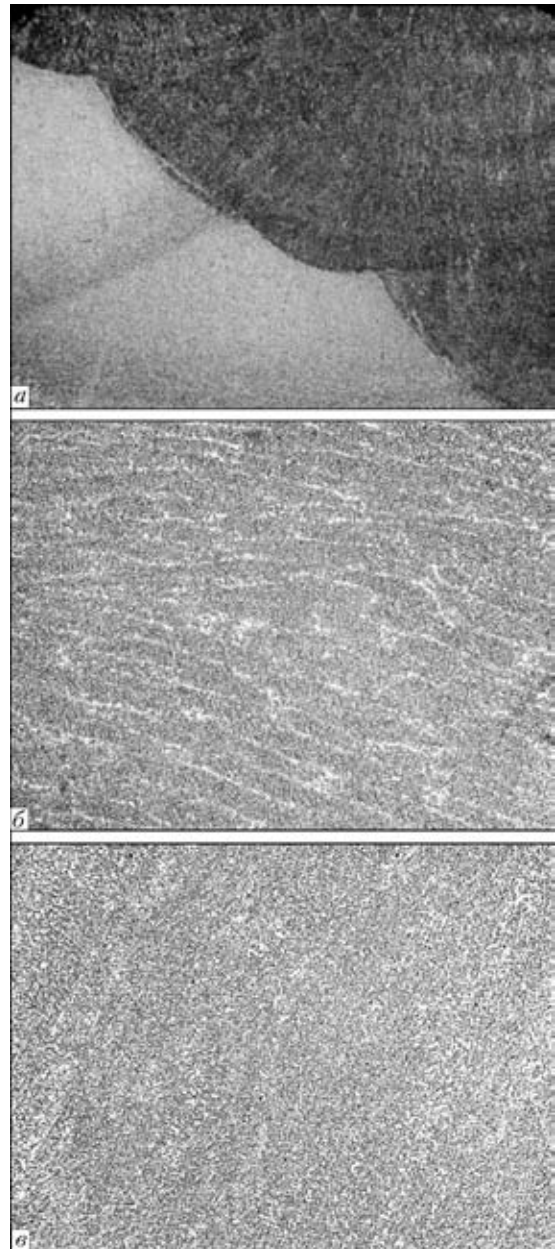


Рис. 9. Микроструктура образца колеса с двухэлектродной наплавкой гребня проволокой Св-08ХМ (а),  $\times 25$ ; верхнего (б),  $\times 200$  и нижележащего слоя (в),  $\times 200$

повышается производительность наплавки. Микроструктура металла, наплавленного двумя электродами (проволока СВ-08ХМ диаметром 3 мм, флюс АН-348АМ, скорость наплавки 28...30 м/ч), как и в случае одноэлектродной наплавки, представляет собой бейнит, но с большей долей феррита (рис. 9). При этом твердость наплавленного металла находится в пределах HRC 22...24 (верхний слой наплавки) и HRC 20...21 (нижележащие слои).

В заключение следует отметить, что остаточные растягивающие напряжения, возникающие после ТВЧ отжига поверхности катания, полезны для выявления дефектов и отбраковки колес в ходе их ремонта. Отжиг перед наплавкой гребней позволяет уменьшить твердость поверхностного слоя, что дает возможность уменьшить толщину стружки при восстановлении, повысить эффективность наплавки, изменить структуру металла перед наплавкой,



уменьшить вероятность возникновения дефектов в наплавленном слое и в околосшовной зоне.

1. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колесных пар: ЦВ/3429. Утв. М-вом путей сообщ. — М.: Транспорт, 1977. — С. 54–57.
2. Дюренко В. Н. Эксплуатационная надежность колесных пар грузовых вагонов // Ж.-д. трансп. — 2002. — № 3. — С. 24–28.
3. Мамыкин С. М. Анализ влияния влажности на износ колесных пар пассажирских вагонов // Эффективность безопасности и триботехники. — 1999. — № 1. — С. 46–47.
4. Новый подход к контролю дисков колес железнодорожных вагонов / А. М. Шанурин, Д. Г. Комлев, Г. И. Кравченко, С. Ю. Кузьмин // Дефектоскопия. — 2002. — № 9. — С. 90–95.

5. Астис А. Е., Гутман Л. М. Восстановление изношенных гребней бандажей наплавкой // Сб. тр. по автоматической сварке под флюсом. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1948. — С. 281–298.
6. Наплавка гребней вагонных колесных пар / Н. В. Павлов, И. Д. Козубенко, И. Е. Бызова, А. И. Рассоха // Ж.-д. трансп. — 1993. — № 7. — С. 37–40.
7. Иванов И. А., Урушев С. В. О повышении ресурса цельнокатаных колес // Там же. — 1998. — № 7. — С. 25–26.
8. Пат. 44373 Украина. Спосіб відновлення поверхні кочення коліс рейкового транспорту / В. В. Матвеев. — Оpubл. 15.02.2002, Бюл. № 2.
9. А. с. 433222 СССР, С21d9/34 и 1/32. Способ восстановления профиля катания колес / С. В. Алексин, Ф. Я. Богданов, А. Ф. Богданов и др. — Заявл. 26.05.72; Оpubл. 25.06.74, Бюл. № 23.
10. Меликов В. В. Многоэлектродная наплавка. — М.: Машиностроение, 1988. — 140 с.

Features of wear of railway wheels and applied technologies of wheel flange reconditioning by surfacing are considered. Experience of reconditioning the wheel flanges after annealing of the rolling surface is described. Advantages of such a technology of flange reconditioning are noted.

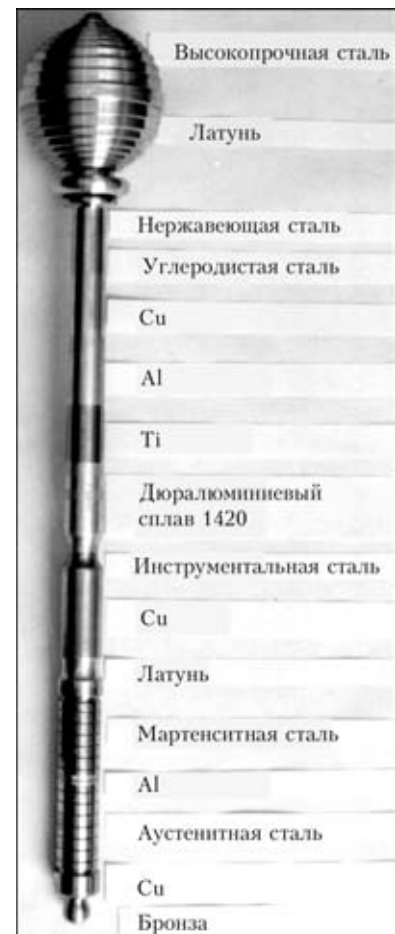
Поступила в редакцию 08.02.2005

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны технологии и режимы сварки трением различных металлов и сплавов в одно- и разнородном сочетании и созданы промышленные технологии сварки конкретных изделий из различных комбинаций металлов и сплавов, в том числе:*

- инструментальных сталей с конструкционными (составной концевой металлорежущий инструмент);
- коррозионностойких сталей с конструкционными (валы химических насосов, ролики отделочных машин текстильного производства);
- жаропрочных сталей с конструкционными (биметаллические клапаны двигателей автомобилей, роторы турбокомпрессоров дизелей);
- легированных высокопрочных сталей с углеродистыми равного и неравного сечения (корпуса гидроцилиндров, штоки поршней, валы аксиально-поршневых гидромашин);
- термически упрочненных и нагартованных алюминиевых сплавов (панели из сплава АМг6НПП со шпильками из сплава Д16Т);
- меди и алюминия с металлокерамикой;
- меди, бронзы и латуни со сталью (блоки цилиндров аксиально-поршневых гидромашин);
- алюминия и его сплавов со сталью (биметаллические переходники для приборов авиакосмической техники);
- алюминия с медью (переходники для электротехнической промышленности);
- титана со сталью.

*Для реализации технологий создана серия специализированных машин для сварки заготовок диаметром 10...100 мм. Машины характеризуются простотой конструкции, надежностью и долговечностью, высокой степенью автоматизации и производительностью. Отличительной особенностью машин для инерционной сварки трением является применение разработанного в ИЭС электромагнитного силового привода, обеспечивающего упрощение конструкции машины, высокую надежность, быстроедействие, стабильность режима сварки, возможность изменения осевого усилия по любой программе.*



**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 26  
 Тел. (38044) 261 53 55; факс: (38044) 287 63 29  
 E-mail: chvertko@paton.kiev.ua



# ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ С 9 % ХРОМА\*

**В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук, **С. И. МОРАВЕЦКИЙ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны разработанные присадочные материалы для механизированной сварки под флюсом теплоустойчивой стали с 9 мас. % хрома. Показано, что механические свойства металла шва и сварных соединений указанной стали, полученных с использованием предложенных сварочных материалов, соответствуют установленным требованиям.

*Ключевые слова:* дуговая сварка под флюсом, теплоустойчивые стали, сварные соединения, мартенситная структура, порошковая проволока, высокоосновный флюс, механические свойства

В последние годы в энергомашиностроении увеличилось применение новых теплоустойчивых сталей мартенситного класса с массовой долей хрома 9 %, предназначенных для изготовления высокотемпературных узлов энергоблоков ТЭС [1, 2]. Их использование позволяет повысить рабочие параметры пара — температуру  $T$  до 610 °С и давление  $P$  до 25...30 МПа. При этом коэффициент полезного действия (КПД) энергоблоков может достигать 45 %.

Для традиционно используемых в теплоэнергетике сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ) предельные (критические) значения рабочих параметров пара не превышают  $T = 565$  °С и  $P = 24$  МПа при КПД до 36 %, что исключает их применение в высокотемпературных узлах установок нового поколения со сверхкритическими параметрами. В условиях исчерпания проектного ресурса фактические значения рабочих параметров снижаются ниже допустимых пределов, что приводит к понижению КПД, неэффективному использованию топлива и увеличению количества вредных атмосферных выбросов. Вследствие этого возникла необходимость в замене отработавшего энергооборудования в Украине новым, более совершенным. При этом особую актуальность приобретает проблема разработки отечественных сварочных материалов для сварки теплоустойчивых сталей с 9 мас. % хрома (типа стали Р91), имеющих следующий химический состав, мас. %: 0,06...0,12 С; 8,0...9,5 Cr; 0,85...1,05 Мо; 0,2...0,5 Si; 0,3...0,6 Mn; 0,1...0,4 Ni; 0,18...0,25 V; 0,06...0,10 Nb; 0,03...0,07 N; не более 0,02 S и P.

К сварным соединениям трубопроводов и толстостенного корпусного оборудования в энергомашиностроении

предъявляются высокие требования относительно качества сварных швов, показателей физико-механических свойств их металла, его стойкости против образования холодных трещин. При этом необходимо также обеспечить в наплавленном металле минимальную степень загрязненности неметаллическими включениями и максимально низкие содержания диффузионного водорода и вредных примесей.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана система флюс-порошковая проволока (типа ПП-08Х9НМАФБ), позволяющая с помощью автоматизированной сварки под флюсом получать сварные соединения стали с 9 мас. % хрома, имеющие прочностные свойства не ниже основного металла. Применяемый высокоосновный флюс изготавливается способом, базирующимся на твердофазном синтезе исходных шихтовых компонентов [3]. Основу шихты составляют оксиды различных металлов и фторид кальция, образующие шлаковую систему  $MgO-CaF_2-Al_2O_3-SiO_2$ . Флюсу, разработанному для сварки сталей с 9 мас. % хрома, была присвоена марка СФТ-9.

Для оценки химического состава наплавленного металла, полученного с применением разработанных сварочных материалов, и определения его механических характеристик сваривали стыковые соединения пластин толщиной 16 мм с V-образной разделкой кромок. Сварку проводили с предварительным подогревом до 250 °С на режиме, приведенном в табл. 1. Свариваемая сталь соответствовала следующему составу, мас. %: 0,085 С; 8,85 Cr; 1,0 Мо; 0,33 Si; 0,43 Mn; 0,12 Ni; 0,25 V; 0,069 Nb; 0,045 N; 0,015 S; 0,013 P.

Сварные соединения подвергали послесварочной термообработке (высокий отпуск при 760 °С

**Таблица 1. Режим сварки стыковых соединений стали с 9 мас. % хрома\***

№ прохода	Способ сварки	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , м/ч
1 (корневой)	Ручная неплавящимся электродом в аргоне	90	13	—
2–3	Автоматическая под флюсом	240...280	40...42	24,6
4–8		290...320	40...42	21,7

\* Диаметр присадочной и электродной проволоки составлял 2 мм.

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



Таблица 2. Химический состав наплавленного металла, мас. %\*

Сварочные материалы (порошковая проволока + флюс)	C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	V	Nb	N	S	P
ПП-08X9HMAФБ + флюс СФТ-9	0,07	8,5	0,8	0,28	0,8	0,65	0,20	0,057	0,048	0,009	0,019
C9MV-UP + флюс BV910	0,11	9,0	1,0	0,3	0,7	0,7	0,2	0,05	—	—	—
OK-Tubrod 15.23 S + флюс OK-FLUX 10.63	0,10	9,0	1,0	0,3	1,0	0,5	0,2	0,05	0,04	—	—

\* Два последних химических состава взяты из каталогов-справочников соответственно фирм Böhler и ESAB.

Таблица 3. Результаты механических испытаний при  $T = 20^\circ\text{C}$ 

Объект исследования	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCV_{1,2}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Металл шва	709	600	17,7	52,4	$\frac{46,0...69,5}{57,0}$
Металл сварного соединения	641...652*	—	—	69,7...67,8	$\frac{138...177}{164}$ **
Основной металл	696	547	21,6	72,7	$\frac{217...224}{220}$
Требования по DIN 32525 [4]					
Металл шва	585...850	$\geq 415$	$\geq 17$	—	$\geq 51$

\* место разрушения образцов — основной металл на расстоянии 4...5 мм от линии сплавления. \*\* надрез по линии сплавления.

в течение 2 ч). После чего из металла сварного соединения вырезали образцы для механических испытаний по ГОСТ 6996-66 и шлифы для металлографических исследований.

В табл. 2 представлен химический состав наплавленного металла, полученного с использованием сварочных материалов с 9 мас. % хрома. Как видно из таблицы, разработанные сварочные материалы обеспечивают химический состав наплавленного металла практически такой же, как у сварочных материалов других производителей.

Содержание остаточных газов в металле шва следующее, мас. %: 0,042 [O]; 0,00035 [H]. Концентрация диффузионного водорода, определенная спиртовым методом [5] при выдержке проб в течение 24 ч, составила 0,22 см<sup>3</sup>/100 г наплавленного металла.

Как показал металлографический анализ, в наплавленном металле имеются неметаллические включения оксидного, оксисульфидного и силикатного типов, а также весьма мелкодисперсные нитриды. Относительная доля  $S$  неметаллических включений различных размеров  $d$  в наплавленном

металле, полученном с использованием разработанной системы проволока-флюс, представлена ниже:

$d$ , мкм	0,5...1,0	1,0...1,5	1,5...2,0	2,0...2,5	2,5...3,0	3,0...4,0
$S$ , мас. %	26,90	49,08	17,25	4,93	1,23	0,62

При этом общая объемная доля неметаллических включений составляет в металле шва 0,194, а в основном — 0,101. Из приведенных данных следует, что в металле шва преобладают мелкие ( $d = 0,5...1,5$  мкм) неметаллические включения.

Результаты механических испытаний, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что показатели прочности и пластичности удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сварным соединениям стали типа P91.

Таким образом, определено, что сварные соединения новых теплоустойчивых сталей мартенситного класса с массовой долей хрома 9 %, выполненные механизированной сваркой под синтетическим флюсом в сочетании с предлагаемой порошковой проволокой, отличаются высоким качеством и имеют требуемые механические свойства. При этом наплавленный металл характеризуется невысоким содержанием вредных примесей (менее 0,02 мас. % серы и фосфора), достаточной степенью чистоты по неметаллическим включениям (общая объемная доля 0,192 %) и низкой концентрацией диффузионного водорода (менее 1 см<sup>3</sup>/100 г наплавленного металла).

1. Ольховский Г. Технологии для тепловых электростанций // Газотурбин. технологии. — 1999. — № 2. — С. 4-7.
2. Скульский В. Ю., Царюк А. К. Проблемы выбора свариваемой стали для высокотемпературных компонентов энергоблоков ТЭС // Автомат. сварка. — 2004. — № 3. — С. 3-7.
3. Синтетические сварочные флюсы: изготовление и область применения / Б. С. Касаткин, А. К. Царюк, Ю. Н. Вахнин и др. // Там же. — 1994. — № 3. — С. 62-66.
4. Filler metals for the steel X10CrMoVNb91 W.-Nr.I.4903 and grade P91/T91 according to ASTM/ASME: Böhler welding. Product Informations. — Düsseldorf: Böhler Schweisstechnik GmbH, 1993. — 16 S.
5. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.

Developed welding consumables for the mechanized submerged arc welding of heat-resistant steel with 9 % Cr are described. It is shown that mechanical properties of weld metal and welded joints of the mentioned steel produced using the above-mentioned consumables are in compliance with the established requirements.

Поступила в редакцию 27.12.2004



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА МОЩНОСТЬЮ 10 кВт

П. ЗАЙФФАРТ, проф. (SLV, г. Росток, Германия)

Описан принцип действия и приведены основные технические характеристики оптоволоконной лазерной установки мощностью 10 кВт. Представлены примеры использования данной установки для лазерной обработки материалов (сварки, резки, модификации поверхности).

*Ключевые слова:* оптоволоконный лазер, лазерная обработка материалов, сварка, резка, модификация поверхности

В современной промышленности, кроме маркировки деталей, важнейшими процессами лазерной обработки материалов являются сварка, резка, а также модификация поверхностей (закалка, легирование, переплав и наплавка). Наряду с получившими широкое распространение CO<sub>2</sub>-лазерами, мощность излучения которых составляет несколько (часто свыше десятка) киловатт, на протяжении последних лет успешно внедряются Nd:YAG-лазеры мощностью до 5 кВт. Основным достоинством последних является возможность гибкой передачи излучения по оптическому волокну, что упрощает их эксплуатацию (например, делает возможной автоматизацию с использованием антропоморфных роботов). Вместе с тем Nd:YAG-лазеры как с ламповой накачкой, так и с диодной из-за своих габаритов и сравнительно низкого КПД (полный КПД до 6%) не могут в полной мере обеспечить преимущества твердотельного лазера по отношению к газовым.

Данная проблема решена немногим более двух лет назад. Группой ученых под руководством В. Гапонцева разработаны оптоволоконные иттербиевые лазеры высокой (единицы и десятки киловатт) мощности с длиной волны излучения 1070 нм. Благодаря малым размерам, высокому (более 15%) полному КПД, надежности, длительной работе без профилактических ремонтов и другим преимуществам они могут использоваться в

тех случаях, когда, кроме высокой мощности и гибкости передачи излучения, требуется мобильность самого лазерного источника (рис. 1).

Принцип работы оптоволоконного лазера показан на рис. 2. Излучение отдельных многомодовых диодных источников со значительной расходимостью с помощью оптических волокон собирается и передается к торцам иттербиевого оптоволокну, являющегося активной средой. Брэгговские зеркала пропускают излучение накачки и создают резонатор, позволяющий выводить когерентное излучение с длиной волны 1070 нм с одного из концов активной среды. Выведенное излучение передается по оптическому волокну и посредством выводного коллиматора и фокусирующего объектива может быть подведено к месту использования (обрабатываемой детали, анализатору излучения, измерителю мощности и др.).

Основными преимуществами такого лазера по сравнению с диодным являются наличие излучения с одной длиной волны и отдельное расположение диодов накачки. Последнее важно с позиций надежности, поскольку охлаждение отдель-

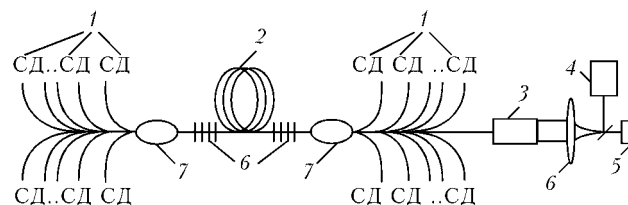


Рис. 2. Принцип работы волоконного лазера: 1 — многомодовые диоды для накачки активного волокна; 2 — активное волокно; 3 — коллимированный выходной лазерный пучок; 4 — оптический измеритель мощности; 5 — анализатор луча; 6 — линза; 7 — многомодовое устройство ввода-вывода; 8 — волоконные брэгговские зеркала; СД — светодиод



Рис. 1. Общий вид волоконной лазерной установки

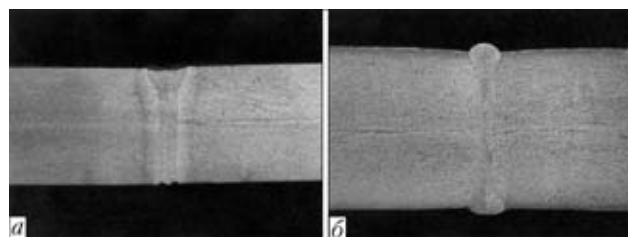


Рис. 3. Примеры использования оптоволоконного лазера мощностью 6,9 м/мин для сварки стыкового шва на стали 1.4301: а — макрошлиф соединения толщиной 5 мм, скорость сварки 4 м/мин, один проход; б — макрошлиф соединения толщиной 10 мм, скорость сварки 3 м/мин, сварка двухсторонняя

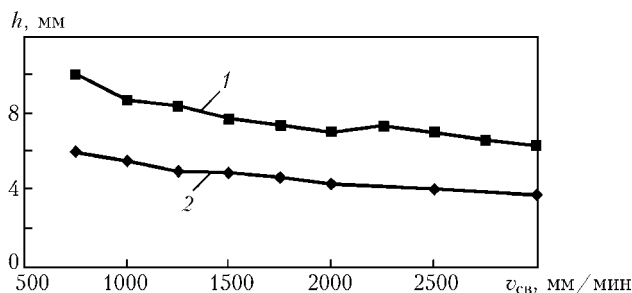


Рис. 4. Влияние скорости сварки на глубину проплавления в стали 1.4301 толщиной 10 мм: 1 — оптоволоконный лазер мощностью 6,9 кВт; 2 — Nd:YAG-лазер мощностью 4 кВт; положение фокуса — 0; диаметр фокального пятна — 0,4 мм

ных диодов лучше, чем торцов диодов, набранных в матрицы.

В Учебно-исследовательском центре земли Мекленбург Форпоммерн (г. Росток) с сентября 2004 г. впервые в мире эксплуатируется технологическая установка на основе иттербиевого волоконного лазера мощностью 10 кВт с весьма небольшими для своего уровня мощности габаритами (1600×1200×790 мм) и массой всего 900 кг. Элек-

тропитание осуществляется от трехфазной сети, минимальный ток составляет до 63 А.

Примеры лазерной сварки листов металла про-резными швами показаны на рис. 3, 4. Наряду с технологическими исследованиями по сварке, резке и модификации поверхностей в лаборатории изучали возможности применения этого лазера в составе мобильного комплекса непосредственно на территории заказчика. С этой целью разработали необходимую технологическую оснастку. Для стационарной работы в качестве обрабатывающих головок использовали имеющуюся головку для сварки и нанесения покрытий фирмы «Precetec» и головку для резки фирмы «Permanova». Сварочную головку можно адаптировать соответствующим образом для гибридной сварки. Наряду с обрабатывающими головками для стационарных систем имеется лазерная головка фирмы «Mobil-Laser-Tec» для ручной сварки и резки.

На основании предварительных экспериментов можно сделать вывод о целесообразности технологического использования волоконных лазеров и их предпочтительности по сравнению с диодными и Nd:YAG-лазерами.

The operating principle of a fiber-optic laser is described, and the main technical characteristics of a fiber-optic laser unit of 10 kW power are given. Applications of this unit for laser treatment of materials (welding, cutting, surface modifying) are presented.

Поступила в редакцию 17.12.2004

УДК 621.791.629.12.011

## ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ СВАРКИ В СУДОСТРОЕНИИ

Л. Н. ОРЛОВ, канд. техн. наук, А. А. ГОЛЯКЕВИЧ, В. Н. УПЫРЬ, С. П. ГИЮК, инженеры (ООО «ТМ. ВЕЛТЕК», г. Киев)

Описана самозащитная порошковая проволока для широкого использования в судостроении. Приведены химический состав и механические свойства наплавленного металла, а также условия поставки проволоки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, порошковая проволока, судостроение, условия поставки

Анализ состояния сварки в мировом судостроении показал устойчивый и динамичный рост применения механизированной и автоматизированной сварки порошковой проволокой. Верфи крупнейших судостроительных компаний Японии, Южной Кореи, Финляндии около 80 % всего объема сварочных работ выполняют газозащитными порошковыми проволоками малого диаметра (1,0...1,2 мм). Преимуществами применения порошковой проволоки являются высокая производительность работ, товарный внешний вид шва и высокие сварочно-технологические характеристики; упрощение техники сварки в различных пространственных положениях и легкость ее освоения; возможность обеспечения необходимых механических свойств. Эффективность применения порошковых проволок необходимо

оценивать не по отдельным этапам, а по повышению общей производительности технологического процесса изготовления металлоконструкций. В судостроении стран СНГ преобладает ручная сварка покрытыми электродами и механизированная сварка в защитном газе проволокой сплошного сечения. В последние годы наблюдается заметный рост использования импортных порошковых проволок малого диаметра. Последнее связано прежде всего с отсутствием эквивалентного отечественного аналога, а также наличия ряда факторов, затрудняющих применение порошковых проволок отечественного производства. Среди них отсутствие надежного специализированного сварочного оборудования; вероятность появления пористости; проблема подаваемости по шлангам; повышенное выделение сварочного аэрозоля; недостаточные механические свойства сварных швов. В последние годы в судостроении России и



**Таблица 1. Режимы сварки проволоки ППС-ТМВ7 при выполнении угловых и стыковых швов (защитный газ CO<sub>2</sub> или смесь 82Ar + 18CO<sub>2</sub>)**

Пространственное положение	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость подачи проволоки, м/ч	Производительность наплавки, кг/ч
Вертикальное	160... 210	23... 27	270... 500	2,0... 3,5
Нижнее	260... 350	28... 32	690... 960	4,5... 6,1
Горизонтальное	160... 250	23... 26	270... 650	2,0... 3,9

Примечание. Коэффициент использования проволоки равен 1,15.

Украины сварочные технологии подвергаются пересмотру: наблюдается заметный рост применения газозащитных порошковых проволок взамен покрытых электродов и проволоки сплошного сечения марки Св-08Г2С. Потребность судостроения удовлетворяется путем импорта порошковых проволок ведущих мировых производителей: ESAB (Швеция), «Welding Alloys» (Англия), «Filarc» (Нидерланды), «Kobeke» (Япония), «Hyundai» (Южная Корея) и др. В то же время производственные мощности отечественных предприятий-производителей порошковых проволок позволяют полностью удовлетворить потребности отечественного судостроения в порошковой проволоке малого диаметра (1,2 мм).

Задачи по созданию порошковой проволоки, не уступающей по техническим характеристикам лучшим зарубежным образцам, и обеспечению отечественного судостроения газозащитными порошковыми проволоками малого диаметра, решены одним из ведущих производителей порошковых проволок в Украине ООО «ТМ. ВЕЛТЕК». В 1994–1996 гг. выполнен комплекс НИР, позволивший разработать и освоить производство газозащитной порошковой проволоки нового поколения марки ППС-ТМВ7 диаметром 1,0...2,5 мм ТУУ 19369185.008–96. Порошковая проволока ППС-ТМВ7 и ее производство одобрены Российским морским регистром судоходства (РМРС) и Lloyds register.

При разработке композиции проволоки реализованы последние достижения в области металлургии дуговой сварки. Быстрозатвердевающий рутиловый шлак повышенной основности позволяет выполнять сварку во всех пространственных положениях. Система легирования обеспечивает механические свойства наплавленного металла, соответствующие типу E7T1 по стандарту AWS A5.20-95. Особенно эффективно применение ППС-ТМВ7 при сварке

**Таблица 2. Механические свойства наплавленного металла при температуре испытаний –20 °С**

Показатель	Механические свойства			
	σ <sub>в</sub> , МПа, не менее	σ <sub>т</sub> , МПа, не менее	δ, %	KCV <sub>1,2</sub> Дж/см
Требования ТУ	490...600	375	22,0	47
Результаты испытаний	560...620	440...500	23...25	80

угловых и стыковых швов в вертикальном, горизонтальном и потолочном положениях с защитой CO<sub>2</sub> или смесью 82Ar + 18CO<sub>2</sub>. При этом производительность наплавки достигает 3,5 кг/ч (табл. 1).

Использование данной порошковой проволоки высокоэффективно при выполнении корневого прохода стыковых соединений во всех пространственных положениях с применением керамических подкладок. Типичный химический состав наплавленного металла имеет следующее содержание, мас. %: 0,05 углерода; 0,35 кремния; 1,45 марганца; 0,015 серы; 0,015 фосфора. Реализация газшлаковой защиты сварочной ванны сводит к минимуму чувствительность к пористости от грунтов. Комплексное легирование металла шва в сочетании с низким содержанием вредных примесей обеспечивает требуемые прочностные и пластические свойства при высоком уровне ударной вязкости металла шва (табл. 2).

Усовершенствованная технология изготовления обеспечивает стабильное качество порошковой проволоки. Она легко адаптируется к любым типам полуавтоматов для механизированной сварки в защитном газе, характеризуется легкой подаваемостью по шлангам полуавтоматов. Порошковая проволока ППС-ТМВ7 сертифицирована УкрСЕПРО. Испытания выпускаемой продукции контролируются системой качества TÜF на ОАО «Днепромметиз». Поставка проволоки осуществляется в мотках в прокаленном состоянии, в стандартных кассетах К200 и К300 в полной готовности к применению. Проволока упаковывается в металлические барабаны массой 50...70 кг по ГОСТ 26101–84. По согласованию с потребителем она может паковаться в картонные коробки по одному мотку или кассете с предварительной упаковкой в полиэтиленовый пакет.

ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» производит поставку порошковой проволоки на условиях: франко-перевозчик FCA или через своих дилеров в Российской Федерации.

Self-shielded flux-cored wire for a wide application in shipbuilding is described. Composition and mechanical properties of the deposited metal, as well as delivery conditions are given.

Поступила в редакцию 30.12.2004



### ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

Фигурная вырезка из листового проката почвообрабатывающего инструмента с режущими кромками (дисковых борон, лап культиваторов, лемехов и отвалов плугов) производится обычно на станочном механическом оборудовании (прессах, токарных, фрезерных станках) в несколько операций.



Рис. 1. «Агроплазма-1»

Предприятие НПМГП «Плазматрон» (г. Киев, ул. Э. Потье, 9,а, тел. (044) 456-23-36, 456-40-50; E-mail: plasmtec@iptelecom.net.ua.) — известный разработчик разнообразных установок для воздушно-плазменной резки металлов — освоило производство установок, обеспечивающих высокопроизводительное и качественное изготовление указанных выше изделий путем плазменной вырезки их по контуру при одновременном формировании режущей кромки с закалочной структурой.

Установка «Агроплазма-1» (рис. 1) состоит из механизма, обеспечивающего в автоматическом режиме вырезку из листовой стали марки 65Г тол-



Рис. 2. Резак установки «Агроплазма-2»

щиной 6 мм дисков борон разных размеров с одновременным получением режущих кромок требуемого угла скоса, на котором крепится плазменный резак, режущим газом которого является сжатый воздух, подаваемый от цеховой пневмосети или малоомощного компрессора (давление 5...6 кг/см<sup>2</sup>, расход 4 м<sup>3</sup>/ч). Линейная скорость резки 1,5 м/мин обеспечивает выход одной бороны за 1,5...2 мин. В качестве источника электропитания плазменного резака применяется специальный выпрямитель мощностью 50...80 кВт.

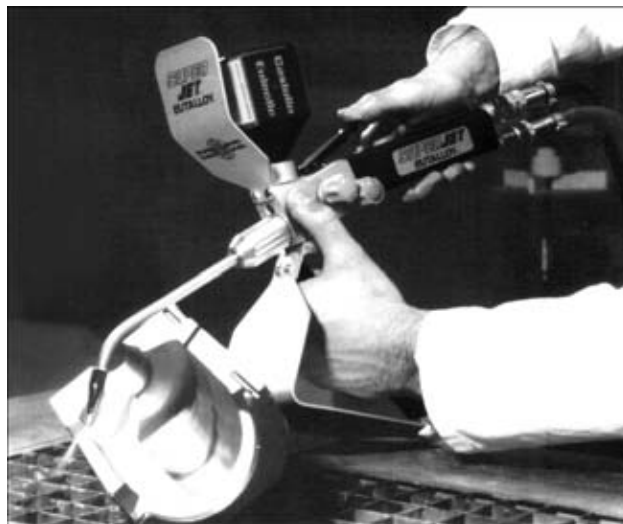
Установка «Агроплазма-2» состоит из магнитокопировальной машины с креплением на ней аналогичного плазменного резака (рис. 2) и комплектуется тем же выпрямителем. На этой установке можно осуществлять по копиру вырезку из листовой стали марки 65Г толщиной 6 мм деталей несложной конфигурации (лапы культиваторов, лемехи и отвалы плугов).

По желанию заказчика обе установки могут комплектоваться ручным резаком с водяным или воздушным охлаждением, обеспечивающим резку крупногабаритного листа на заготовки для последующей фигурной вырезки их на механизмах указанного выше типа.

### ПРЕЦИЗИОННАЯ И ПРОСТАЯ В ОБСЛУЖИВАНИИ ГОРЕЛКА ДЛЯ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ С ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

Фирмой «Castolin Eutectic» (Швейцария) разработана легкая и надежная в эксплуатации горелка SuperJet Eutalloy, предназначенная для использования как в небольших мастерских, так и на крупных заводах.

Применяемые для наплавки порошки из сплава EUTALLOY засасываются струей кислорода, протекающей через инжектор, и разрежением, созданным этим способом. Расход металлического порошка регулируется сварщиком с помощью рычага, помещенного на рукоятке горелки. Смешивание газов происходит только после засасывания ме-





таллического порошка. Горелка для газопорошковой наплавки с проплавлением SuperJet Eutalloy обеспечивает самые высокие требования по безопасности в работе:

- разрежение, необходимое для транспорта металлического порошка, создается только струей кислорода, таким образом невозможен обратный удар сварочного пламени до бачка с порошком.
- специальная конструкция наконечников предохраняет от возможного обратного удара.
- горелка снабжена клапаном, с помощью которого по мере необходимости быстро отсекается приток газа. После повторного открытия клапана и последующего зажигания вытекающей газовой смеси регулировка пламени (отношение горючего газа к кислороду) остается неизменной.
- изменение диапазона тепловой мощности пламени происходит только путем замены наконечника горелки.

Горелка предназначена для наплавки поверхностных слоев, характеризующихся высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью. Процесс наплавки заключается в нанесении избранных легированных металлических порошков, микроскопических размеров с помощью специальной ацетиленовой горелки на определенную поверхность предмета, которая во время этой операции подлежит оплавлению. Частицы металлического порошка во время переноса через сопло и пламя нагреваются и получают значительную кинетическую энергию, затем попадают на поверхность предмета, где происходит путем диффузии соединение с основным металлом. Высокий технический уровень системы SuperJet Eutalloy и широкий ассортимент порошков Eutalloy находят практическое применение при ремонтах и изготовлении деталей в почти всех отраслях промышленности.

#### СИСТЕМА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ И ЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЯ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ

Фирма Solutions By Innovation (Австрия) разработала современный прибор плазменной сварки PSW-500 для выполнения сварочных точек путем сварки оплавлением. Сварочное соединение получают без присадочного материала (рис. 1).

Плазма обеспечивается высоким напряжением и поддерживается с помощью переносимой на изделие дуги.

Особенная фокусировка плазменного луча дает возможность концентрации тепловой энергии на свариваемую точку (рис. 2). При этом время

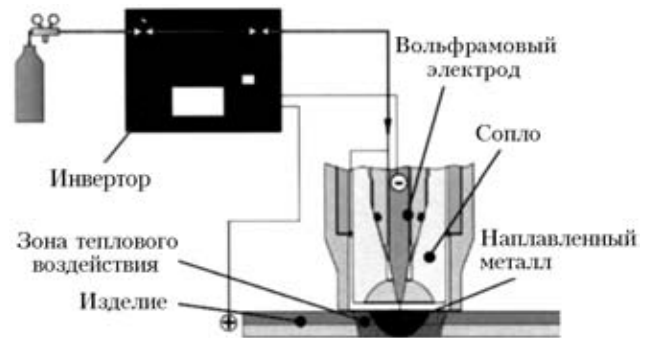


Рис. 1. Схема выполнения точечной сварки

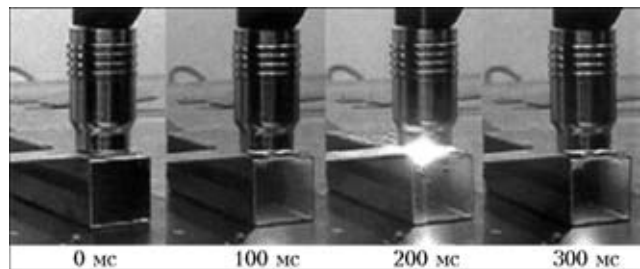


Рис. 2. Кинетика выполнения точечной сварки

сварки является коротким и окружающие место сварки зоны прогреваются мало. Термические коробления минимальны. Благодаря фокусированию возможно точное позиционирование на свариваемую точку.

Результаты сварки PSW-500 сравнимы с результатами лазерной сварки, причем стоимость аппарата составляет лишь некоторую часть стоимости установки для лазерной сварки.

Интерфейс автоматизации позволяет применение прибора вместе с роботом. Для удобства параметризации, документации и постоянного контроля процесса можно применить программное обеспечение визуализации для Windows.

PSW-500 благодаря гибкой параметризации и высокочастотному регулированию процесса сварки дает возможность точной воспроизводимости режима сварки в различных областях применения.

#### Примеры применения.

- Точечная сварка листового алюминия и листовой стали для производства баков и распределительных ящиков, в машиностроении, автомобильной и пищевой промышленности.
- Точечная сварка облицовочных листов на видимых поверхностях.
- Стежковая сварка листов.
- Многослойные листовые соединения.
- Точечная сварка профилейных деталей.



## ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Я. П. Черняк (ИЭС) 6 апреля 2005 г.  
защитил кандидатскую диссертацию  
на тему «Разработка материалов и  
технологии наплавки изношенных  
рельсов на действующей трамвайной  
колее»**

Наиболее существенные результаты работы диссертанта включают:

для наплавки деталей из высокоуглеродистых сталей без подогрева разработаны экономнолегированная порошковая проволока аустенитного класса и принципиально новая порошковая проволока ферритного класса, в состав шихты которой введен сильный карбидообразователь – титан, полностью предотвращающий образование мартенсита в наплавленном металле. Наличие двух порошковых проволок разных систем легирования значительно расширяет технологические возможности наплавки и номенклатуру деталей из высокоуглеродистых сталей, восстанавливаемых методами дуговой наплавки без подогрева;

показано, что для предотвращения образования трещин типа отколов, наплавку первого валика аустенитной проволокой необходимо вести на повышенной погонной энергии  $Q = 28...30$  кДж/см. При этом структура ЗТВ вместо мартенсита представляет собой более пластическую перлитно-бейнитную смесь. Последующие валики можно наплавлять на оптимальном

режиме с погонной энергией 10...15 кДж/см. В отличие от этого наплавка всех валиков ферритной проволокой производится на одном и том же оптимальном режиме;

изучены триботехнические характеристики наплавленного металла ферритного и аустенитного классов в парах трения с образцами из высокоуглеродистой рельсовой стали М76. Наилучшую износостойкость и наименьший коэффициент трения имеет пара трения «наплавленный металл аустенитного класса Г13Х13Н2МФ + сталь М76». Из ферритных материалов лучшие триботехнические свойства у пары трения «наплавленный металл ТЗС1М + сталь МГ6»;

проведены санитарно-гигиеническая и сварочно-технологическая оценка разработанных порошковых проволок ферритного (ПП-АН203) и аустенитного (ПП-АН202) классов для наплавки изношенных трамвайных рельсов без подогрева. Эти проволоки включены в ТУ Украины 28.7.05416923.066–2002, что дает возможность производить их в промышленных масштабах;

разработана технология наплавки трамвайных желобчатых рельсов без их демонтажа на действующей трамвайной колее. Для реализации новой технологии разработан и изготовлен комплекс оборудования для наплавки изношенных трамвайных рельсов. Технология, материалы и оборудование прошли опытно-промышленную проверку в ГКП «Киевнастрас» при наплавке участка кривой на действующем трамвайном пути.

Восстановление трамвайных рельсов непосредственно в пути не только упрощает и ускоряет ремонтные работы, но позволяет экономить около 340 грн. на каждом погонном метре рельсов. Срок службы восстановленных рельсов по сравнению с новыми увеличится в 2...5 раз.

УДК 621.79(088.8)

ПАТЕНТЫ И ЗАЯВКИ В ОБЛАСТИ  
СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Наплавочный станок**, отличающийся тем, что в него введено устройство согласования с исполнительным элементом, установленное с возможностью кинематической связи между механизмом вращения наплавочной головки и механизмом ее вертикального перемещения, на каретке закреплена рукоятка и маховик, кинематически связанный с зубчатой рейкой траверсы. Патент РФ 2246384. В. В. Никитин (ЗАО «ГАКС-РЕМАРМ») [5].

**Машина для стыковой сварки полос**, отличающаяся тем, что станина машины выполнена Н-образной формы с карманами в верхней части, снабжена установленными с возможностью горизонтального перемещения в упомянутых карманах двумя подружженными ползунами, несущими механизмы сведения, зажима и центрирования и кинематически связанными с корпусом ножниц, в средней части станины выполнено вертикальное отверстие для крепления гидроцилиндра ножниц, при этом неподвижные ножи установлены в верхней части корпуса гидроцилиндра, а подвижный нож — на корпусе ножниц, выполненном с возможностью вертикального перемещения по предусмотренным на корпусе гидроцилиндра направляющим с помощью тяг и траверсы, закрепленных на штоке этого гидроцилиндра. Патент РФ 2246385. В. Н. Баранов, С. А. Федоров, В. И. Барабанов (ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения») [5].

**Машина для контактной стыковой сварки**, отличающаяся тем, что ее зажимы выполнены в виде консольной конструкции незамкнутого типа, а отрезной узел выполнен в виде отдельного блока, жестко соединенного с неподвижной станиной и имеет направляющие, обеспечивающие возможность возвратно-поступательного перемещения режущего устройства перпендикулярно к оси агрегата для его выдвижения к полосе при обрезке концов рулонов и отведения в исходное положение при работе металлургического агрегата, а сам отрезной инструмент выполняется в виде аллигаторных ножниц рычажного типа. Патент РФ 2246386. В. Г. Моксичев, А. Ф. Новицкий, Г. М. Крюков и др. (ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ») [5].

**Устройство для контактной сварки**, отличающееся тем, что снабжено двумя токосъемными пластинами, между которыми установлены в один ряд изолированные друг от друга и от токосъемных пластин две одинаковые токоподводящие пластины, соединенные с вторичными обмотками трансформатора и имеющие электрические контакты с токосъемными пластинами по наружным плоскостям, на боковых поверхностях токосъемных пластин выполнены направляющие типа «ласточка хвоста» и закреплены электрододержатели, причем все нечетные электроды электрически связаны с одной токосъемной пластиной, а четные — с другой токосъемной пластиной, при этом в токосъемных пластинах выполнены каналы для водоохлаждения. Патент РФ 2246387. А. Б. Белов [5].

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

**Способ формирования напряжения при электродуговой сварке**, отличающийся тем, что исходное напряжение снижают в





момент зажигания дуги до напряжения горения дуги с помощью реактивного элемента, подключаемого последовательно с доплатительным источником переменного напряжения и общей точкой двух последовательно соединенных диодов, присоединенных к выходу мостового выпрямителя. Патент РФ 2247013. Н. М. Чуйко, Д. Н. Чуйко [6].

**Электроподдержатель для ручной дуговой сварки**, отличающийся тем, что токоподводящая втулка выполнена в виде полого цилиндра, с одной стороны, в которой в диаметральном противоположных отверстиях установлен конец зажимного валика, снабженного с одной стороны наклонной выточкой, а с другой — маховичком таким образом, что выточка, качающаяся опора в виде полукруга и прорези в стенке втулки, расположенные в плоскости, перпендикулярной оси валика, образуют узел установки и крепления электрода, а с другой стороны втулки установлен узел соединения со сварочным кабелем, выполненный в виде конического соединения, причем коническое отверстие закреплено на конце сварочного кабеля, а конус соединения установлен во втулке так, что его задний торец является основанием для качающейся опоры. Патент РФ 2247636. С. Н. Аникин, В. К. Арцыбашев, А. П. Брадул [7].

**Способ изготовления металлических сотовых конструкций**, отличающийся тем, что производят формообразование гофрированных лент с бортами, имеющими открытую малку, а в сварочной машине используют неразъемную электродную рейку с расположенными снаружи прижимами и после фиксации ленты на упомянутой рейке осуществляют окончательную гибку бортов ленты на  $90^\circ$  в рабочих частях фильеры после освобождения ленты от фиксаторов. Патент РФ 2247637. Н. Ф. Баранов, И. Ф. Костенко, М. А. Уржунцев и др. (ОАО «НПО Поволжский авиационный технологический институт») [7].

**Способ удаления дефектов металла многопроходной электронно-лучевой сваркой**, отличающийся тем, что фокус электронного луча располагают на поверхности изделия или луч расфокусируют, изменяя ток фокусировки не более чем на 5 % от величины этого тока при расположении фокуса на поверхности изделия, а сварку во время спада тока луча ведут с уменьшением ширины каждого последующего слоя по сравнению с предыдущим, при этом площадь поверхности центральной части сварного соединения, образованной в результате пересечения участков сварного шва по каждому направлению восьмилучевого раstra, составляет не более  $1/25$  общей площади сварного шва. Патент РФ 2247638. А. Б. Александров, В. Н. Варыгин, А. А. Кислицкий и др. (ОАО «Новосибирский завод химконцентратов») [7].

**Способ сварки трением стыковых соединений из алюминиевых сплавов**, при котором на стыке деталей предварительно выполняют сквозное отверстие, в которое погружают вращающийся инструмент, отличающийся тем, что ось отверстия располагают под углом  $\alpha$  к нормали к поверхности деталей в плоскости их стыка, определяемом соотношением  $\alpha = (0,8+1,0)\delta$ , диаметр отверстия задают в пределах  $D = \delta + (0,10+0,15)$  мм, наконечник заглабливают в стык на  $(0,90+0,95)\delta$ , где  $\delta$  — толщина деталей, а скорость перемещения инструмента вдоль стыка деталей регулируют в пределах  $0,20...0,35$  мм/об. Патент РФ 2247639. В. В. Овчинников, В. И. Рязанцев (ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ») [7].

**Способ поджига кислородного копья**, отличающийся тем, что высококонцентрированный кислород из копья подают на мелкодисперсный порошок пирофорного металла, например, циркония или титана, который воспламеняется при контакте с кислородом, при горении воспламеняет смесь порошков металлов и совместно с последним обеспечивает поджиг копья. Заявка РФ 2003122226/02. Б. Эрикссон, Л. Эрикссон (Феррокс АБ) [5].

**Способ изготовления металлических сотовых конструкций**, отличающийся тем, что производят формообразование гофрированных лент с бортами, имеющими открытую малку, а в сварочной машине ленту устанавливают на неразъемную электродную рейку, фиксацию ленты на рейке производят расположенными снаружи лент прижимами, а окончательную гибку

бортов ленты на  $90^\circ$  производят в опорных частях фильеры после освобождения ленты от фиксаторов. Заявка РФ 2003122525/02. Н. Ф. Баранов, И. Ф. Костенко, М. А. Уржунцев и др. (ОАО «НПО «Поволжский авиационный технологический институт») [5].

**Способ сварки взрывом**, отличающийся тем, что предварительно производят обработку поверхностей свариваемых пластин до шероховатости  $R_z = 8,0...12,0$  мкм, а сварку осуществляют давлением продуктов детонации, время действия которых превышает время остывания расплавленных на глубину более 2 мкм поверхностных слоев пластин. Заявка РФ 2003125043/02. В. К. Ашаев, Г. С. Доронин, Е. И. Ермолович, В. Б. Яшин (ФГУП «ГосНИИмаш») [5].

**Устройство для диффузионной сварки**, отличающееся тем, что вакуумная камера выполнена в виде переносного контейнера, приспособленного для нагрева в промышленной печи, а пресс выполнен малогабаритным и помещен в контейнер, где сжат совместно с заготовками, при этом пресс выполнен в виде устройства, увеличивающего свое усилие сдвигания в зависимости от температуры нагрева. Заявление РФ 2003125585/02. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, В. П. Гордо, Г. Н. Шевелев (ФГУП «НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежаля») [5].

**Шихта для экзотермической наплавки стальных деталей**, отличающаяся тем, что в качестве оксида железа взята окалина после дробеструйной обработки стальных деталей, прошедших термическую обработку, а грануляция порошков оксида железа и алюминия составляет 10...40 мкм, причем компоненты взяты в следующем соотношении, мас. %: после дробеструйной обработки стальных деталей 68...71 окалины; 29...31 алюминия; 0,4...0,6 соды. Заявка РФ 2003124722/02. Н. Н. Кувшинова, Ю. В. Казаков (Тольяттинский госуниверситет) [5].

**Способ диффузионно-реактивного соединения металлов и сплавов**, отличающийся тем, что для повышения качества соединения путем уменьшения толщины жидкой прослойки в шве и расширении технологических возможностей способа вследствие обеспечения выполнения различных типов соединений детали собирают с фиксированным минимальным по ширине соединяемым зазором, а металл-депрессант размещают непосредственно около этого зазора. Заявка РФ 2003122946/02. В. С. Несмих, К. А. Юценко, Т. Н. Кушнарева (МО «Интерм») [6].

**Способ сварки деталей из металлов**, отличающийся тем, что ультразвуковые колебания возбуждают в каждой из свариваемых деталей, при этом в интервале частот от 5 до 2000 кГц регистрируют частоту и амплитуду ультразвуковых колебаний в каждой из свариваемых деталей, а частоту возбуждения ультразвуковых колебаний в каждой из свариваемых деталей выбирают равной частоте, при которой амплитуда ультразвуковых колебаний в каждой из деталей максимальна. Заявка РФ 2002125910/02. Б. И. Турышев, В. Н. Половинкин, А. П. Соловьев, В. Б. Турышев [6].

**Способ сварки деталей из металлов**, отличающийся тем, что ультразвуковые колебания возбуждают в одной из свариваемых деталей путем пропускания через нее импульсов сварочного тока длительностью от 0,5 до 1000 мкс и скважностью от 1,0 до 0,001. Заявка РФ 2002125911/02. Б. И. Турышев, В. Н. Половинкин, А. П. Соловьев, В. Б. Турышев [6].

**Способ монтажной сварки изделий из чугуна с шаровидным графитом**, в первую очередь трубопроводов воды, пара, нефти и газа, отличающийся тем, что с целью повышения эксплуатационной надежности и снижения стоимости сварных соединений свариваемые кромки предварительно наплавляют железоникелевым сплавом расчетного и экспериментально установленного состава (С 1,5...1,7 %, Ni 48...52 %) при регламентированной высоте наплавленного слоя (5...6 мм — рабочий слой), что обеспечивает равнопрочность и высокую пластичность сварного соединения; высокую технологичность монтажной сварки без подогрева и термообработки стыков. Заявка РФ 2003124705/02. И. Б. Лужанский (ОАО Липецкий метзавод «Свободный сокол») [6].



**Порошковый питатель**, содержащий бункер и дозирующий узел, отличающийся тем, что бункер состоит из соосно расположенных внешнего и внутреннего контейнеров с основаниями в виде конусов и возможностью вертикального перемещения внутреннего контейнера относительно внешнего на величину  $Z$ , определяемую по формуле  $Z = R \operatorname{tg} \alpha (-1 + \sqrt{N + 1})$ , где  $R$  — меньший радиус конического основания внутреннего контейнера;  $\alpha$  — угол при основании конуса;  $N$  — соотношение компонентов смеси, при этом бункер связан через втулку с заслонкой с дозирующим узлом, содержащим смеситель, двигатель и ролик ведущий, а смеситель выполнен с возможностью вращения и расположен под углом  $45 \dots 60^\circ$  к горизонтальной плоскости. Заявка РФ 2003126726/06. Т. Г. Чернова, В. М. Неровный [6].

**Способ контроля качества сварных и паяных соединений разнородных материалов**, при котором в зоне припуска выполняют выступ, прикладывают к нему нагрузку для разрушения части соединения, расположенной в зоне припуска, и по величине нагрузки судят о качестве соединения, отличающийся тем, что выступ выполняют на одном из материалов, а примыкающую к нему зону припуска с частью соединения выполняют в виде кольца, ось которого совпадает с осью заготовки. Заявка РФ 2003125055/02. В. Н. Елкин, В. П. Гордо, Е. Ю. Ривкин (ФГУП «НИКИ энерготехники») [6].

**Способ соединения литого твердого сплава со стальной основой**, отличающийся тем, что в процессе образования соединения растекание расплава ограничивают, добавляя шихтовую массу в виде спеченных гранул, и получают на поверхности основы слой затвердевшего твердого сплава требуемой толщины. Заявка РФ 2003124391/02. Ю. В. Коллойда, А. А. Бабаев (Новосибирский ГТУ) [6].

**Порошковая проволока для наплавки деталей металлургического оборудования**, отличающаяся тем, что шихта дополнительно содержит карбид кремния при следующем соотношении компонентов, мас. %: 12...14 ферровольфрама; 2,5...4,0 хрома металлического; 0,5...1,0 феррованадия; 0,4...1,0 ферромарганца; 0,1...0,4 графита; 0,1...1,0 карбида кремния; остальное железный порошок. Заявка РФ 2003123898/02. С. А. Шамин (ОАО «Череповецкий сталепрокатный завод») [6].

**Способ ремонта деталей машин**, включающий подготовку поверхности детали и восстановление заданных геометрических

параметров детали с использованием многослойной наплавки присадочного материала, а также механической обработки, отличающийся тем, что на ремонтируемой детали перед наплавкой слоя присадочного материала монтируют его заготовку, наплавку слоя осуществляют электронным сканирующим лучом в вакууме, а механическую обработку осуществляют после наплавки каждого слоя присадочного материала. Заявка РФ 2003126226/02. В. А. Гейкин, В. В. Докашев, Ю. С. Елисеев и др. (ФГУП «Салют») [6].

**Устройство для соединения деталей**, отличающееся тем, что оно снабжено неподвижно закрепленной внутри камеры загрузки платформой с размещенной на ней плитой, установленной с возможностью перемещения по платформе, блоком давления, установленным в камере нагрева, опорами с каналами для размещения витков индуктора, установленными на рабочем столе, и блоке давления и графитовыми плитами, размещенными на опорах, контейнер для размещения обрабатываемой детали выполнен разборным и содержит металлическую форму, внутренняя часть которого выполнена по форме обрабатываемой детали. Заявка РФ 2002134932/02. А. П. Сигачев, Р. С. Курочка, В. С. Фадеев и др. [7].

**Устройство для сварки модулированным током**, отличающееся тем, что модулятор установлен в разрыв цепи управления сварочным током между системой автоматического управления и источником постоянного тока, при этом модулятор состоит из коммутатора, схемы управления им и делителя, причем коммутатор выполнен с одним выходом, который является и выходом модулятора, и с тремя входами, один из которых является управляющим и подключен к выходу схемы управления коммутатором, второй вход подключен к системе автоматического управления, а третий — к делителю. Заявка РФ 2003125475/02. С. Р. Аманов, А. Р. Шишкин, А. В. Корчин, Д. Ю. Копылов (ОАО «Автоваз») [7].

**Порошковая проволока для износостойкой наплавки**, отличающаяся тем, что в состав частиц порошка на основе карбида вольфрама входят также карбид титана и кобальт, а оболочка проволоки выполнена из малоуглеродистой стали при следующем соотношении компонентов, мас. %: 35...50 карбида вольфрама; 1,0...3,5 карбида титана; 2...6 кобальта; 0,2...2,5 порошка алюминия; 0,2...0,7 кремнефтористого натрия; остальная стальная оболочка. Заявка РФ 2003125633/02. В. В. Рыбин, А. В. Баранов, Е. В. Андронов и др. (ФГУП «ЦНИИ «Прометей») [7].

## ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ\*



*BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH (Польша), 2004. — Рос. 48, № 5 (пол. яз.)*

**Czwornog B.** Польский сварочный центр совершенства: результаты работ и достижения первой фазы проекта, с. 27–30.

**Brozda J.** Современные жаростойкие материалы и их сварка, с. 30–40.

**Opiekun Z., Orłowicz A. W.** Формирование структуры поверхностного слоя отливок из кобальтовых сплавов с помощью плазмы электрической дуги, с. 43–49.

**Matusiak J.** Вредное воздействие пыли и газов, выделяющихся в процессе сварки металлов на здоровье персонала. Выбор технологических условий сварки в аспекте ограничения эмиссии вредных веществ, с. 50–62.

**Orłowicz A. W., Trytek A.** Применение способа GTAW при поверхностном упрочнении чугуновых отливок, с. 63–72.

**Piatek M.** Индукционный нагрев в промышленной практике, с. 72–74.

\* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона.



*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония), 2003. — Vol. 41, № 1 (яп. яз.)*

**Направления** развития технологий соединения алюминия, с. 2–19.

**Maeda K. et al.** Применение сварки алюминия полупроводниковым лазером, с. 20–24.

**Terasaki T. et al.** Сварочные деформации и остаточные напряжения соединений чистого титана, с. 25–30.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония), 2003. — Vol. 41, № 2 (яп. яз.)*

**Yamaguchi S., Osumi S.** Строительство пешеходных алюминиевых мостов, с. 1–10.

**Sasabe S. et al.** Свариваемость алюминиевых сплавов при лазерной сварке деталей автомобилей, с. 11–19.

**Ogawa K. et al.** Сварка трением магниевого сплава AZ31, с. 21–28.

**Koyama K. et al.** Повышение прочности паяных соединений путем использования серебряных вставок. Ч. 2. Разработка способа пайки разнородных Al–Cu соединений, с. 29–36.



*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония), 2003. — Vol. 41, № 3 (яп. яз.)*

**Производство** алюминия и алюминиевой продукции в 2002 г., с. 1–11.

**Takahashi K.** Современные способы контроля лазерной сварки, с. 12–19.

**Aizawa T.** Новый способ шовной сварки давлением с использованием магнитного потока высокой плотности тонколистового алюминия, с. 20–25.

**Takahashi K.** Прочность зоны шва соединений тонколистового алюминия, выполненных высокоскоростной сваркой CO<sub>2</sub>-лазером, с. 26–31.

**Японский** промышленный стандарт на испытания сварных соединений алюминия, с. 32–36.

**Nakagawa Y.** Оптоволоконное оборудование для нагрева «мягким» лучом, с. 37–39.

*JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония), 2004. — Vol. 73, № 3 (яп. яз.)*

**Техническая** спецификация. Предупреждение порообразования при лазерной сварке с выходной модуляцией, с. 3.

**Специальный** выпуск для молодых специалистов.

**Hirokawa N.** Применение моделей поверхности отклика и метода накопленных аппроксимирующих функций для проектирования, с. 5–12.

**Izui K.** Современное состояние оптимизации генетических алгоритмов и их применение на начальных этапах проектирования, с. 13–18.

**Yonezawa S.** Основные направления развития и примеры применения новых компьютерных программ автоматизации (интеграции) и оптимизации «SIGHT», с. 19–22.

**Ojio Y. et al.** Оптимальный метод проектирования лопаток компрессора, учитывающий разброс девиации частоты, с. 23–27.

**Miyasaka F.** Лекции по теории дуговых явлений. Основы моделирования сварочных процессов, с. 28–31.

**Matsuda H., Ono M.** Лекции для практикующихся инженеров. Современное состояние и проблемы технологий сварки листовой стали с обработанной поверхностью, с. 32–38.

*PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша), 2004. — № 5–7 (пол. яз.)*

**Pilarczyk J., Banasik M. et al.** Лазерные технологии в автомобильной промышленности, с. 33–38.

**Wojcicki S., Sielanko W. et al.** Технология электронно-лучевой сварки в автомобильной промышленности, с. 39–43.

**Klimpel A., Lisiecki A. et al.** Лазерная сварка стыковых соединений тонких оцинкованных стальных листов, с. 44–47.

**Faerber M.** Роль газа в процессе лазерной сварки, с. 48–50.

**Papkala H., Pietras A. et al.** Точечная сварка оцинкованных листов, с. 51–57.

**Senkara J., Zhang H.** Механизм выплеска жидкого металла во время точечной сварки, с. 58–61.

**Mikno Z., Kozaczynski J. et al.** Контроль качества соединений, выполненных сваркой давлением с использованием систем с искусственным интеллектом на основе нейронных сетей, с. 62–67.

**Mirski Z., Piwowarczyk T.** Склеивание при производстве автомобилей, с. 68–72.

**Krawczyk R., Plewniak J. et al.** Механизированная линия индукционного нагрева гибких валков для автомобильного транспорта, с. 73–75.

**Mirski Z., Granat K.** Пайка автомобильных металлических катализаторов, с. 76–78.

**Ambroziak A., Kisiel A. et al.** Применение ультразвуковых исследований при оценке точечной сварки тонкостенных элементах, с. 79–81.

**Tani J.** Обзор способов высокопроизводительной сварки МИГ, с. 82–84.

**Cegielski P., Kolasa A. et al.** Система управляющих интерфейсов и контроля автоматизированной сварки, с. 85–88.





- Kozak T., Olejnik K.** Применение стандартного дугового питателя при роботизированной сварке, с. 89–93.
- Kudla K.** Алгоритм выбора параметров импульсной сварки в защитных газах, с. 94–96.
- Lukomski A.** Оборудование для процессов сварки в автомобильной промышленности, с. 97–99.
- Rauschenbach D., Nowak M. et al.** Новая концепция зажимов при производстве кузовов автомашин, с. 100–103.
- Nowacki J.** Свариваемость мартенситностареющей стали применительно к конструкции и технологии изготовления лопастного колеса центробежного компрессора, с. 104–108.
- Kalita W., Hoffman J.** Свойства соединений из сплавов магния, свариваемых CO<sub>2</sub>-лазером, с. 109–111.
- Matusiak J.** Технологические аспекты сокращения количества загрязнений, выделения во время сварки плавящимся электродом в защитных газах, с. 112–117.
- Dobaj E., Dobaj-Tumidajewicz B.** Сварочное оборудование в гармонизирующих стандартах, с. 118–120.

*PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша), 2004. — № 8–9 (пол. яз.)*



- Szule T.** Исторический обзор по пайке, с. 19–22.
- Mirski Z., Granat K.** Высокотемпературная пайка стальных отопительных радиаторов для ванных комнат, с. 23–26.
- Mirski Z., Granat K.** Повышение качества паяных соединений инструментов на основе спеченного углерода, с. 27–30.
- Leonczyk M.** Высокотемпературная пайка инструментов на основе спеченного углерода на примере соединения со сталью, с. 31–33.
- Plewniak J., Krawczyk R., Luto M.** Применение индукционного нагрева в процессах высокотемпературной пайки, с. 34–38.
- Paskov I., Sokin S.** Опыт в области разработки, производства и использования припоя на основе меди, с. 39–42.
- Wielage B., Mucklich S., Hoyer I.** Стальные паяные соединения (чугуна) с бронзой в червячных шестернях, с. 43–46.
- Boretius M.** Вакуумная пайка — состояние технологии и ее развитие, с. 47–49.
- Reinkensmeier I.** Внедрение техники вакуумной пайки и термообработки — прогрессивный метод соединения металлических элементов, с. 50–52.
- Baranowski J., Babul T., et al.** Влияние технологических факторов на пайку стали 18-8 припоем AgCu<sub>42</sub>Ni<sub>2</sub>, с. 53–56.
- Baranowski J.** Высокотемпературная пайка компонентов в авиационной промышленности, с. 57–59.
- Winiowski A.** Высокотемпературная пайка в вакууме — возможности и примеры, с. 60–64.
- Bartnik Z., Derlukiewicz W.** Пайковсварка давлением медных листов с использованием дополнительного сопротивления, с. 65–68.
- Gruszczyk A.** Поверхностные свойства жидких сплавов типа Ni–В, с. 69–71.
- Bergmann J., Wilden J.** Технологические аспекты низкотемпературной диффузионной пайки однородных и разнородных соединений, с. 72–75.
- Wilden J., Bergmann J.** Соединение оцинкованной стали — современное состояние и перспективы, с. 76–80.
- Klimpel A., Czuprynski A., Gorka J.** Автогенная пайка тонких оцинкованных листов с помощью способа МИГ, с. 81–85.
- Ambroziak A., Lange A.** Исследование микроструктур соединения Al–Cu, паяных сплавом AlCu<sub>20</sub>Ag<sub>36</sub>, с. 86–88.
- Pantelejenko F.** Перспективные вспомогательные эвтектические материалы при реакционной пайке, с. 89–92.



- Wielage B., Trommer F. et al.** Применение припоя на основе Al и Zn при высокотемпературной пайке с добавлением флюса в печах с защитной атмосферой, с. 93–97.
- Wlodarski Z.** Исследование свойств флюсов для пайки алюминия и его сплавов, с. 98–100.
- Ambroziak A., Felba J., Kisiel R.** Бессвинцовые припои для электроники, с. 101–104.
- Senkara J.** Энергетическое состояние поверхности металла при смачиваемости жидким припоем, с. 105–108.
- Nowacki J.** Структура и свойства соединений из нержавеющей мартенситностареющих сталей, паяных в вакууме припоем Au–Ni, с. 109–112.
- Kuzio T.** Сертифицированная технология и компетентный персонал — основа обеспечения качества паяных изделий, с. 113–115.
- Sozanski L.** Ультразвуковой контроль соединений, паяных при высокой температуре, с. 116–117.

*PRAKTIKER (Германия), 2004. — № 9 (нем. яз.)*



- Simler H, Krink V., Laurisch F.** Расширение области применения резки тонким плазменным пучком, с. 260–265.
- Выставка «EuroBLECH 2004» (ЕВРОЛИСТ)** — Передача технологий в перерабатывающую лист отрасль, с. 1–16.
- Сварочные работы в областях с потенциальной опасностью взрыва и пожара**, с. 270–271.



**Springfield P.** Портальная роботизированная установка для сварки колосниковых решеток, с. 274–278.

*QUARTERLY JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония), 2004. — Vol. 22, № 2 (May) (яп. яз.)*

**Herold H., Pchennikov A., Snreitenberger M.** Оценка зарождения горячих трещин по лабораторным методикам и результатам экспериментальных измерений на конечноэлементной модели в процессе сварки крупногабаритных изделий, с. 211–217.

**Suita Y., Nagai H., Shinike S. et al.** Явления, наблюдаемые в вакууме, при дуговой сварке полым вольфрамовым электродом алюминия, с. 218–223.

**Hirata Y., Osamura T., Onda M. et al.** Моделирование процесса капельного переноса короткими замыканиями. Ч. 1. Изучение процесса по модели явлений капельного переноса, с. 224–232.

**Kimura M., Kusaka M. et al.** Влияние внутреннего диаметра на момент трения при сварке трением труб, с. 233–239.

**Tong H., Ueyama T.** Решение проблем, связанных с подрезом дуги и образованием микробрызг, при импульсной сварке МИГ на переменном токе, с. 240–247.

**Sasaki S., Oguma M. et al.** Плавление и резка пучков медной проволоки. Ч. 2. Изучение механизмов равномерного расплавления пучков медной проволоки ИАГ лазером, с. 248–253.

**Nishio K., Katoh M. et al.** Визуальное исследование микроструктуры зоны соединения плакированного Al/Ti материала. Ч. 4. Структура и свойства плакированного материала после вакуумной сварки прокаткой, с. 254–260.

**Jeong B., Nishimoto K., Saida K.** Микроструктура поверхности раздела гиперсоединения ультрамелкозернистой стали. Ч. 2. Поверхность раздела гиперсоединения ультрамелкозернистой стали, с. 261–271.

**Mori T., Minami K. et al.** Влияние режима металлизации и свойства стали на усталостную прочность изделий после горячего цинкования. Ч. 3. Усталостная прочность сварных соединений, обработанных горячим цинкованием погружением в расплав, с. 272–281.

**Kawaguchi S., Ohata M., Oki Y. et al.** Критические условия зарождения вязких трещин в трубных сталях и использование надрезов в натурных трубопроводах для оценки разрушений под действием внутреннего давления, с. 282–290.

**Kawano T., Matsui M. et al.** Структурные визуальные исследования зоны соединения плакированного материала A3003/SUS304L. Ч. 1. Свойства соединений плакированного материала A3003/SUS304L, выполненных вакуумной сваркой прокаткой, с. 291–299.

**Kawano T., Matsui M. et al.** Влияние термообработки на микроструктуру зоны соединений плакированного материала A3003/SUS304L. Ч. 2. Свойства соединений плакированного материала A3003/SUS304L, выполненных вакуумной сваркой прокаткой, с. 300–308.

**Fukumoto M., Tsubaki M. et al.** Соединение сплава ADC12 с нержавеющей сталью 400 под действием перемешивания при сварке трением, с. 309–314.

**Song W., Saida K. et al.** Теоретические исследования паяемости при применении алюминиевых припоев. Ч. 1. Получение разнородных соединений сталь-алюминиевый сплав лазерной пайкой, с. 315–322.

**Asakura Y., Takahashi Y.** Изучение специфического выдавливания галтели бессвинцового припоя путем обработки изображений с учетом разброса параметров профиля, с. 323–333.

*QUARTERLY JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония), 2004. — Vol. 22, № 3 (August) (яп. яз.)*

**Abdel-Aleem H. et al.** Влияние оксидной пленки на свариваемость алюминия при ультразвуковой сварке и оценке свойств металла шва, с. 355–363.

**Miyasakaf F. et al.** Влияние формы волны тока на процесс сварки ТИГ на переменном токе алюминиевых сплавов, с. 364–368.

**Fujinaga S. et al.** Разработка способа ИАГ-лазерной стыковой сварки во всех пространственных положениях с изменением присадочной проволоки, с. 369–374.

**Tong H. et al.** Изучение механизмов подавления дымообразования при импульсной сварке МИГ на переменном токе Al-Mg сплавов, с. 375–388.

**Tong H. et al.** Изучение явлений формирования валика и плавления проволоки при импульсной сварке МИГ на переменном токе, с. 389–397.

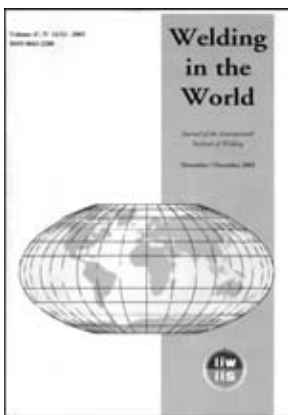
**Fukumoto M. et al.** Изучение влияния нагрева подложки на механизм сплющивания напыляемых частиц, с. 398–402.

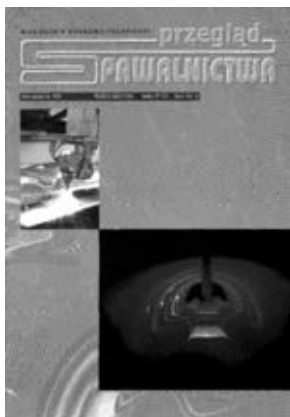
**Kimura M. et al.** Свойства соединений стержней прямоугольного и круглого сечений, выполненных сваркой трением, с. 403–410.

**Murai R. et al.** Изучение магнитострикционного способа измерения динамических напряжений и способа калибровки сталей, используемых в мостостроении. Ч. 2. Экспериментальные исследования применения магнитострикционного способа для измерения полных напряжений стальных сварных конструкций, с. 411–416.

**Sato Y., Ishida M.** Изучение способа управления процессом сварки оплавлением с использованием ШИМ инвертора. Ч.1. Явление оплавления при пропускании переменного тока с прямоугольной формой импульса, с. 417–423.

**Sato Y., Ishida M.** Ч. 2. Способ управления непрерывным оплавлением, с. 424–429.





**Sato Y., Ishida M.** Ч. 3. Способ управления начальным оплавлением при нагреве джоулевым теплом, с. 430–434.

**Koyama A. et al.** Изучение растрескивания покрытий горячего цинкования в зоне соединения козырька со стальной колонной, с. 435–442.

**Miyano Y. et al.** Микробиологическая коррозия сварных швов на нержавеющей стали 316L в морской воде, с. 443–450.

**Nishio K. et al.** Влияние хрома на свариваемость Cu–Cr сплава с таллием при диффузионной сварке, с. 451–457.

**Ito R. et al.** Свойства металла ЗТВ соединений сверхмелкозернистой стали при дуговой сварке в сверхзующую разделку. Ч. 1. Микроструктура и разупрочнение ЗТВ, с. 458–466.

**Yasuda O. et al.** Применение критерия критического зарождения вязкой трещины для оценки состояния угловых соединений балки с опорой. Ч. 2. Применение критерия критического зарождения вязкой трещины для оценки состояния стальных сварных конструкций под многоциклового нагружкой, с. 467–476.

**Takegami H., Shinoda T.** Сварка трением Cu–Cr–Zr сплава, с. 477–483.

*SCIENCE and TECHNOLOGY of WELDING and JOINING (Англия), 2003. — Vol. 8, № 5 (англ. яз.)*



**Hong K. et al.** Модель турбулентности для моделирования тепловых жидких потоков в сварных соединениях, с. 313–324.

**Wei Y. H. et al.** Пакет программного обеспечения для моделирования и прогнозирования образования кристаллизационных трещин при сварке, с. 325–333.

**Moon D. W. et al.** Температура, микроструктура и твердость сварных соединений высокопрочной низколегированной стали, с. 334–339.

**De A., Parle D.** Система слежения в реальном времени процесса автоматизированной дуговой сварки плавлением, с. 340–346.

**Kim I. S. et al.** Сравнение методов множественной регрессии и подходов с помощью обратного распространения нейронных сетей при моделировании высоты вершины валика в многопроходных соединениях, выполненных дуговой сваркой плавящимся электродом в среде защитного газа, с. 347–352.

**Eckerlid J. et al.** Усталостные характеристики продольных креплений, сваренных с использованием присадочного материала с низкой температурой превращения, с. 353–359.

**Colegrave P. A., Shercliff H. R.** Экспериментальный и численный анализ сварных соединений сплава алюминия 7075-T7351, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 360–368.

**Bang H.-S. et al.** Механические характеристики сварных соединений, выполненных многоточечной контактной сваркой, с. 369–376.

**De A., Maiti S. K. et al.** Моделирование конечными элементами лазерной точечной сварки, с. 377–384.

**Lambrakos S. G. et al.** Анализ сварных швов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с помощью измерений термометрами, с. 385–390.

*SCIENCE and TECHNOLOGY of WELDING and JOINING (Англия), 2004. — Vol. 9, № 1 (англ. яз.)*



**Babu S. S., David S. A. et al.** Соединение монокристаллов суперсплава на никелевой основе, с. 1–12.

**Henderson M. B., Arrell D. et al.** Практический опыт сварки суперсплавов на никелевой основе, применяемых в промышленных газотурбинных установках, с. 13–21.

**Abe F., Tabuchi M.** Микроструктура и предел ползучести сварных швов современных ферритных сталей для энергетического оборудования, с. 22–30.

**Letofsky E., Cerjak H.** Металлография микроструктуры сварных швов стали 9Cr для энергетического машиностроения, с. 31–36.

**Shirzadi A. A., Wallach E. R.** Новый метод диффузионного соединения суперсплавов, с. 37–40.

**Brett S. J.** Образование трещин типа IIIa в сварных швах паропроводов из стали 1/2 %CrMoV, с. 41–45.

**Muthupandi V., Bala Srinivasan P. et al.** Влияние добавки азота на образование вторичного аустенита в сварных швах нержавеющей дуплексной стали и полученные свойства, с. 47–52.

**Yang T. C. et al.** Механические свойства нержавеющей стали 422 после ремонта с помощью лазерной сварки с подачей проволоки, с. 53–58.

**Sopousek J., Foret R. et al.** Моделирование разнородных сварных соединений стали P91, с. 59–64.

**Haferkamp H., Bunte J. et al.** Лазерная сварка пористого алюминия, с. 65–71.

**Ramirez A. J., Brandi S. D.** Применение модели точечного источника тепла с дискретным распределением для моделирования термических сварочных циклов в листовых материалах средней толщины, с. 72–82.

**Fuji A.** Сварка трением сплава Al–Mg–Si с низкоуглеродистой сталью Ni–Cr–Mo, с. 83–89.

**Wang J. et al.** Исследование поведения дуги при сварке ТИГ и формирования шва, с. 90–94.





## НОВЫЕ КНИГИ



**ТИТАН: ТЕХНОЛОГИИ ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВО.** — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм.

Сборник содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Специальная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2001–2004 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области титана и его производства. Для широкого круга читателей, занимающихся проблемами производства, обработки и потребления титана.

### Статьи из журнала «Современная электрометаллургия»

*Ахошин С. В.* Математическое моделирование процесса растворения включений TiN в расплаве титана при ЭЛП  
*Шейко И. В., Лапаш Ю. В., Константинов В. С., Степаненко В. В.* К вопросу о применении независимых источников нагрева для утилизации промышленных отходов титана и его сплавов  
*Григоренко Г. М., Шейко И. В., Помарин Ю. М., Чадок Э. Н., Орловский В. Ю.* Разработка технологических принципов выплавки гомогенных слитков алюминидов титана с применением плазменно-дугового и индукционного источников нагрева  
*Калинюк А. Н., Жук Г. В., Тригуб Н. П.* Определение глубины залегания усадочной раковины в слитках ЭЛП титанового сплава Ti-6Al-4V  
*Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю.* Кинетика взаимодействия азота с жидкими цирконием и титаном  
*Буряк Т. Н., Вахрушева В. С., Ладохин С. В., Лапшук Т. В., Левицкий Н. И., Мирошниченко В. И.* Получение титановых труб из заготовок электронно-лучевой плавки с использованием отходов  
*Рябцев А. Д., Троянский А. А.* Производство слитков титана, хрома и сплавов на их основе в камерных электрошлаковых печах под «активными» металлосодержащими флюсами  
*Жук Г. В., Калинюк А. Н., Тригуб Н. П.* Моделирование режимов вывода усадочной раковины в цилиндрических слитках ЭЛП  
*Жук Г. В.* Расчет толщины слоя интерметаллидов, образующихся при нанесении титановой и алюминиевой матрицы на стальные волокна методом электронно-лучевого диспергирования расплава  
*Калинюк А. Н., Козловец О. Н., Ахошин С. В.* Производство полуфабрикатов из титановых слитков, полученных методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью  
*Рябцев А. Д., Троянский А. А., Пашицкий В. В., Самборский М. В., Картер В. Т.* Использование электрошлаковой технологии для рафинирования титана и титановых сплавов от обогащенных азотом включений  
*Лисиенко В. Г., Насыров Я. А., Климов М. И., Альтман П. С., Ташикин А. Ю., Гончаров А. Е.* Особенности распределения напряжения дуги и частоты капельных замыканий в процессе вакуумно-дугового переплава титановых сплавов  
*Антонюк С. Л., Моляр А. Г., Калинюк А. Н., Замков В. Н.* Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины  
*Касулов А. М., Наконечный Н. Ф., Федоров В. Н., Щекин-Кротов В. А.* Ускоренное охлаждение слитков титана после ЭЛП  
*Иванченко Н. В., Устинов А. И., Мохорт В. А.* Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti-Ni  
*Лесной А. Б., Демченко В. Ф.* Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых сплавов  
*Антонюк С. Л., Король В. Н., Моляр А. Г., Ромашко И. М., Замков В. Н., Топольский В. Ф.* Исследование механических свойств кованых полуфабрикатов опытного титанового сплава T-110  
*Пакули А. Н., Жук Г. В., Тригуб Н. П., Ахошин С. В.* Электронно-лучевое оплавление слитков титана  
*Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н.* Получение слитков  $\gamma$ -алюминидов титана методом ЭЛП  
*Наконечный Н. Ф., Федоров В. Н., Щекин-Кротов В. А.* О функционировании промежуточной емкости при ЭЛП сплавов титана  
*Компан Я. Ю., Протоковилов И. В., Моисеев В. Н.* Высокопрочные и жаропрочные титановые сплавы с интерметаллидами технологии МЭП  
*Наконечный Н. Ф., Федоров В. Н., Щекин-Кротов В. А.* Температура металла на скате расходуемой заготовки при ЭЛП сплавов титана

*Теслевич С. М., Тэлин В. В., Петрунько А. Н., Шварцман Л. Я., Яценко А. П.* Проблемы надежности аппарата магнетермического получения губчатого титана повышенной цикловой производительности  
*Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Жук Г. В., Ахошин С. В., Березос В. А.* Получение полых титановых слитков методом ЭЛП  
*Жадкевич М. Л., Шейко И. В., Теслевич С. М., Шаповалов В. А., Константинов В. С., Степаненко В. В.* Исследование состава газовой атмосферы при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе губчатого титана  
*Антонов С. Н., Журавлев А. В., Антипова Н. В., Копылова Н. Е., Петров В. Д., Калинюк А. Н., Козловец О. Н.* Изготовление титановых труб из металла, выплавленного методом ЭЛП  
*Жадкевич М. Л., Шаповалов В. А., Тэлин В. В., Теслевич С. М., Константинов В. С., Торхов Г. Ф., Бурнашев В. Р.* Исследование состава газовой фазы при плазменно-дуговой плавке титана из пресованной заготовки  
*Папов А. Н.* Определение перспективных направлений разработки конструкций больших грузных печей для изготовления крупногабаритных титановых отливок

### Статьи из журнала «Автоматическая сварка»

*Юштин А. Н., Замков В. Н., Сабокаръ В. К., Четвертко П. Н., Петриченко И. К.* Сварка давлением интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl  
*Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Белоус В. Ю., Замков В. Н.* Аксиальное распределение температуры в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне  
*Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Петриченко И. К., Вржижевский Э. Л., Топольский В. Ф.* Влияние способа сварки плавлением на свойства соединений сплава Ti-6Al-4V  
*Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Белоус В. Ю., Замков В. Н.* Влияние флюсов на температуру и плотность тока в столбе дуги при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом  
*Замков В. Н., Великоиваненко Е. А., Сабокаръ В. К., Вржижевский Э. Л.* Выбор температуры предварительного подогрева  $\gamma$ -алюминидов титана при ЭЛС  
*Киреев Л. С., Замков В. Н.* Сварка титана со сталью в твердой фазе (Обзор)  
*Киреев Л. С., Замков В. Н.* Сварка плавлением титана со сталью (Обзор)  
*Белоус В. Ю.* Дуговая сварка в узкий зазор титановых сплавов (Обзор)  
*Белоус В. Ю., Замков В. Н., Петриченко И. К., Топольский В. Ф.* Присадочная проволока для сварки титанового сплава BT23 в узкий зазор  
*Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н.* Сварка титановых слитков диспергированным расплавом  
*Вайцзла Т. В., Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Повышение износостойкости деталей из титановых сплавов (Обзор)  
*Антонюк С. Л., Король В. Н., Моляр А. Г., Замков В. Н., Топольский В. Ф.* Сопротивление усталости сварных соединений опытного титанового сплава T-110  
*Блащук В. Е.* Титан: сплавы, сварка, применение  
*Белоус В. Ю., Прилуцкий В. П., Замков В. Н.* Влияние управляющего магнитного поля на вольфрамовый электрод при сварке титана в узкий зазор 188  
*Замков В. Н., Вржижевский Э. Л., Топольский В. Ф., Петриченко И. К.* Влияние галогенидных флюсов на пористость швов титанового сплава BT6, выполненных ЭЛС

**ПРЕДЛАГАЮТСЯ ИЗДАНИЯ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ****Книги ❖ Монографии ❖ Труды конференций**

- Ryabov V.R., Dobrushin L.D., Jung-Gi Moon. Welding of Bimetals. — 2003. — 130 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$\*.
- Lysak V.I., Kuzmin S.V. Explosive Welding of Metal Layered Composite Materials. — 2003. — 118 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Juttner B., Vasenin Yu.L. Cathodic Processes of the Metal Vapor Arc. — 2003. — 68 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Междунар. конф., 16–20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В.И. Махненко. — 266 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- Laser Technologies in Welding and Materials Processing: Сб. докл. Междунар. конф., 19–23 мая 2003 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — 2003. — 256 с., формат 200×290 мм (англ. яз.), 100 грн./720 руб./38\$.
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Второй Междунар. конф., 13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В.И. Махненко. — 256 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- Контактная сварка и другие виды сварки давлением: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за 2001–2005 гг., по проблемам различных видов сварки давлением. — 2005. — 128 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- Трубопроводный транспорт: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001–2005 гг., по проблемам трубопроводного транспорта. — 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- КАТАЛОГ. Технологии. Материалы. Оборудование. Содержит информацию о разработанных в последние годы в ИЭС технологиях, материалах и оборудовании для сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов, предлагаемых для коммерческой реализации. — 2005. — 260 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.
- ТИТАН: технологии, оборудование, производство: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за 2001–2004 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. — 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.

**Готовятся к печати в 2005 г.**

- ✓ Письменный А. С. Индукционный нагрев при сварке и родственных технологиях.
- ✓ Гаращук В.П. Вступ до фізики лазерів.
- ✓ Сборник докладов Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing» (23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко, формат 200×290 мм (англ. яз.).
- ✓ Makhnenko V. I., Pochynok V. E. Strength Calculation of Welded Joints with Adjacent Sharp Cavities (англ. яз.).
- ✓ Бондарев А. А., Лозовская А. В. Атлас структур соединений при электронно-лучевой сварке легких конструкционных материалов (рус., англ. яз.).

По вопросам заказа изданий следует обращаться  
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»  
Тел./факс: (38044) 261 54 03, 529 26 23, 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua

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





## НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ДЛЯ РУКОВОДИТЕЛЕЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

12–14 апреля в Воронежском государственном техническом университете (ВГТУ) состоялся научно-практический семинар «Организация современного сварочного производства при изготовлении, монтаже и ремонте оборудования», организованный Российским союзом разработчиков и производителей сварочной продукции, Российским научно-техническим сварочным обществом, кафедрой оборудования и технология сварочного производства ВГТУ и ЗАО «Агромаш» (г. Воронеж). В работе семинара приняли участие более 40 специалистов в области сварки и родственных технологий в основном из Центрально-Черноземного региона Российской Федерации.

Открывая семинар, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства ВГТУ д-р техн. наук, проф. В. В. Пешков отметил, что на семинаре представлено более двадцати докладов и сообщений ученых и специалистов в области сварки и родственных технологий из Российской Федерации и Украины. Он подчеркнул, что впервые за последние годы во ВГТУ удалось собрать такой представительный научно-технический семинар по сварке с привлечением специалистов из известного во всем мире Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Все доклады семинара были опубликованы в специальном сборнике, который участники семинара получили при регистрации.

Затем В. В. Пешков проинформировал участников семинара о тематике его работы:

состояние и перспективы развития современного сварочного производства;

стандартизация и сертификация продукции сварочного производства, подготовка и аттестация специалистов для сварочного производства в соответствии с регламентами Европейской сварочной федерации и Международного института сварки;

технологии, оборудование и материалы для сварки и смежных процессов;

сварные конструкции, контроль их качества, оценка прочности и остаточного ресурса.

У участников семинара значительный интерес вызвали доклады специалистов из Российской Федерации и Украины по проблемам стандартизации, сертификации и подготовки кадров в области сварочного производства и их адаптация к требованиям европейских стандартов.

От Российской Федерации по этим проблемам доктора техн. наук В. В. Смирнов и О. А. Цукуров (Технический комитет по стандартизации «Сварка и родственные процессы» — ТК-364 Минпромэнерго РФ) представили несколько докладов. Техническим комитетом ТК-364 при методической помощи Немецкого сварочного общества были переведены на русский язык около 100 единиц европейской и международной нормативно-технической документации, значительная часть которой адаптирована для пользователей в Российской Федерации.

От ИЭС им. Е. О. Патона канд. техн. наук Ю. К. Бондаренко поделился опытом адаптации национальных стандартов Украины к требованиям международных. В Украине разработаны государственные стандарты серии ДСТУ ISO 3834–2001 «Требования к качеству сварки. Сварка плавлением металлических материалов», которые конкретизируют требования стандартов серии ДСТУ ISO 9000–2001 применительно к сварочному производству. Эти стандарты полностью соответствуют международным.

Канд. техн. наук В. Е. Пономарев (Межотраслевой учебно-аттестационный центр (МУАЦ) ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) рассказал об особенностях профессиональной подготовки сварщиков в соответствии со стандартами компетентности. Обучение в МУАЦ ведется на базе модульных учебных систем, рекомендованных Международной организацией труда и Министерством образования и науки Украины и предусматривающих индивидуальный принцип подготовки с учетом результатов входного тестирования кандидата на обучение. По результатам тестирования подбирается пакет обучающих программ для конкретного слушателя. В процессе обучения широко используются видеофильмы и компьютерные анимации о процессах в сварочной дуге, особенностях пе-



реноса металла при различных способах дуговой сварки и т. п.

Вторая часть научно-практического семинара была посвящена вопросам разработки сварочных и наплавочных материалов, сварочного оборудования и технологий сварки и наплавки конкретных деталей.

Участники семинара имели возможность в свободной дискуссии обсудить проблемы взаимовыгодного сотрудничества в области сварочного производства между учеными и производственниками России и Украины.

В решениях семинара было выражено пожелание сделать его работу регулярной и в будущем расширить круг его участников. Между МУАЦ (ИЭС им. Е. О. Патона), кафедрой оборудования и технологии сварочного произ-

водства ВГТУ и ЗАО «Агромаш» (г. Воронеж) заключено соглашение об организации в Воронеже совместного центра по обучению специалистов сварочного производства, квалификация которых должна соответствовать международным требованиям.

Учитывая всевозрастающую роль наплавки в современной промышленности, решено также наладить сотрудничество в этой области сварочного производства между ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, кафедрой оборудования и технологии сварочного производства ВГТУ и заинтересованными предприятиями Центрально-Черноземного региона Российской Федерации.

И. А. Рябцев, канд. техн. наук

УДК 791:061.2/4



## МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР «КОНТАКТНАЯ СВАРКА И ДРУГИЕ ВИДЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ»

С 19 по 22 апреля в Санкт-Петербурге был проведен семинар «Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование». Организаторами семинара выступили: ОАО «Институт сварки России», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ОАО «Завод Электрик». Семинар проходил на базе центра «Профессионал», имеющего всю необходимую инфраструктуру для проведения подобных мероприятий.

На семинаре были заслушаны следующие доклады.

П. Д. Федоров (Институт сварки России, г. С.-Петербург) в докладе «Тенденции развития контактной сварки в России» отметил, что объем выпуска контактных машин в России и СНГ после 1990 г. сокращался (к настоящему времени почти в 10 раз). Вместе с тем, доля их в целом составляет 25...30 % общего объема сварочного оборудования. Для сравнения — доля оборудования для дуговых способов сварки составляет примерно 50 %. Парк контактного электросварочного оборудования (ЭСО) на заводах России сократился в 2–3 раза. Характерно, что на «АВТОВАЗЕ» парк ЭСО не только не сократился, но и увеличился. Основными производителями контактного ЭСО в России являются «Завод Электрик» (г. С.-Петербург), «Псковэлектросвар», завод «Искра» (Свердловская обл.), завод «ЭСВА» (г. Калининград), «ТЕХНОТРОН» (г. Чебоксары), Институт сварки России (г. С.-Петербург), «Электра-ИТС» (г. С.-Петербург). Объем новых разработок в области контактной сварки в настоящее время значительно сократился и можно утверждать, что основные серийные машины разработаны 15–20 лет назад. Сейчас на российском рынке разработки ведутся в области создания специальных машин, модернизации серийных машин и создания специального технологического оборудования.

А. В. Киселев (ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти) в докладе «Сварка топливных баков из стального проката с алюмокремниевым покрытием для автомобильного производства» отметил, что с 1 июля 2003 г. ввоз в страны ЕС автомобилей с топливными баками из оцинкованного проката запрещен, что заставило автопроизводителей найти замену для материала бензобака, удовлетворяющего как техническим требованиям, так и требованиям экологической безопасности. Наилучшие результаты по коррозионной стойкости в контакте с атмосферой и топливом показала сталь с AlSi-покрытием толщиной 10...24 мкм. При контактной сварке полукорпусов топливных баков происходит загрязнение электродов материалом покрытия, что в свою очередь приводит к непровару. Применение промежуточной вставки из медной проволоки с определенным профилем исключает необходимость зачистки рабочей поверхности роликов (электродов), так как в зону сварки подается новая «порция» электродной проволоки.





Технология контактной роликовой сварки с промежуточным электродом отработана на модернизированной машине для контактной шовной сварки с приводом на оба ролика фирмы «Elfin» (Италия). В настоящее время для программы выпуска автомобилей в ОАО «АВТОВАЗ» при сварке топливных баков из стального проката с AISi-покрытием используют высокопроизводительные машины для контактной шовной сварки с промежуточным электродом фирмы «Soudronic» (Швейцария).

В докладе «Работы Института сварки России (ВНИИЭСО) по созданию оборудования для контактной сварки на постоянном токе» (Б. Н. Резников, Институт сварки России, г. С.-Петербург) дана ретроспектива работ института за 50 лет.

Доклад «О разработке оборудования для контактной точечной сварки без вмятин на лицевых поверхностях изделий» был сделан С. М. Фурмановым, В. П. Березиенко («Белорусско-российский университет», г. Могилев).

П. Н. Чвертко (ИЭС им. Е. О. Патона, г. Киев) в виде обзора осветил доклады сотрудников ИЭС: «Сварка рельсов (опыт применения и перспективы совершенствования)», «Компьютерная система управления и контроля на основе нейросетевой модели», «Контактная стыковая сварка высокопрочных сплавов на основе алюминия», «Оборудование и технология для контактной стыковой сварки железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через аустенитную вставку», «Системы контроля контактной стыковой сварки», «Моделирование процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением изделий компактного сечения», «Технология и оборудование для сварки трением разнородных металлов и сплавов» и «Прессовая сварка с нагревом дугой, управляемой магнитным полем, деталей полого и сплошного сечения».

Наряду с отмеченными были заслушаны такие доклады: «Контактная сварка выводов с основами электродов для аккумуляторов типа НКГ» (О. П. Евятычев, В. А. Фомин, ОАО НИИИ «Источник», г. С.-Петербург; П. Д. Федоров, Институт сварки России, г. С.-Петербург);

«Выбор электродного материала для контактной сварки оцинкованных сталей» (С. Р. Аманов, Л. Н. Русыева, ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти).

«Автоматические системы контроля и диагностики оборудования и параметров процесса контактной электросварки» (Е. М. Щевелев, Н. Н. Зуев, ЗАО «КБ АСТ», г. Псков).

«Контактная стыковая сварка сопротивлением с двойной осадкой» (В. Я. Хазов, П. Д. Федоров, В. Н. Толяренко, Институт сварки России, г. С.-Петербург).

«Энергетические параметры контактной стыковой сварки оплавлением с регулятором оплавления сильного действия» (Л. С. Сергеев, ОАО СКТБ ПЗТЭСО, г. Псков).

«Работа Минского тракторного завода по исследованию и внедрению сварки трением» (В. А. Лактионов, В. И. Дьяченко, С. О. Радюк, Минский тракторный завод). Докладчик сообщил, что в 2005 г. на МТЗ будет внедрена универсальная машина для сварки трением деталей сплошного сечения диаметром до 70 мм и максимальным усилием до 400 кН. В настоящее время МТЗ имеет возможность принимать заказы на поставку универсальных машин комбинированной сварки трением.

«Состояние и перспективы выпуска оборудования в области ультразвуковой сварки и родственных технологий» (И. В. Петушко, ВНИИ ТВЧ им. В. П. Володина, г. С.-Петербург).



«Машина МДВС-1901 для диффузионной сварки деталей низковольтной аппаратуры» (М. А. Сорокин, Институт сварки России, г. С.-Петербург).

«Применение технологии и оборудования холодной сварки в электротехнической промышленности» (Ю. К. Морозов, НПП «Сварка-Контакт-Сервис», г. С.-Петербург).

«Научно-технические издания ИЭС» (А. Т. Зельниченко, ИЭС им. Е. О. Патона). Им, в частности, представлен сборник статей по тематике семинара, отобранных за последние пять лет из журнала «Автоматическая сварка».

Работа семинара 21 апреля была продолжена на ОАО «Завод Электрик». Генеральный директор Ю. Е. Иоффе отметил, что завод уже около 80 лет выпускает машины для контактной сварки и за эти годы накоплен колоссальный и во многом уникальный опыт по разработке, изготовлению и внедрению машин контактной сварки самого различного назначения. В настоящее время завод предлагает более 60 наименований машин для контактной сварки. Кроме того, занимается разработкой технологии сварки, при этом часто оказывает техническую помощь в выборе эффективных подходов к совершенствованию технологических процессов.

Ведущие специалисты завода сделали следующие краткие сообщения: «Оборудование для контактной

сварки производства ОАО «Завод Электрик». Основные направления развития»; «Новая серия машин для шовной контактной сварки производства ОАО «Завод Электрик»; «Расширение номенклатуры оборудования ОАО «Завод Электрик» в части многоэлектродных машин для сварки сеток и сеточных конструкций»; «Технологические преимущества, возникающие за счет изменения сварочного усилия во время протекания сварочного тока»; «Инверторные источники питания для машин контактной сварки»; «Аппаратура управления и контроля для контактной сварки».

22 апреля для участников семинара была организована экскурсия на завод «Форд» (филиал в г. Всеволожске, Ленинградской обл.).

Организаторы семинара планируют провести Третий международный семинар «Контактная сварка и другие виды сварки давлением» в апреле – мае 2006 г. в С.-Петербурге. Точная дата проведения семинара будет опубликована в одном из номеров журнала «Автоматическая сварка».

С материалами семинара и каталогом продукции Завода «Электрик» можно ознакомиться в редакции журнала «Автоматическая сварка».

А. Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук

УДК 621.791.061.2/4

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ «СВАРКА. РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 2005»

25 апреля в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» состоялось открытие «Недели промышленных технологий 2005», включающей семь международных специализированных выставок с демонстрацией широкого спектра промышленного оборудования и технологий: «Элком Украина — энергетика, энергосбережение, электротехника», «Промышленное освещение», «Электронные и электромеханические компоненты», «МашМет — машиностроение и металлообработка», «Сварка. Родственные технологии», «Трубопроводный транспорт» и «Изобретения и инновации». Организаторами этого крупного события, ставшего местом встречи индустриальной элиты Украины, выступили компания «Евроиндекс», немецкая выставочная компания «Fairtrade GmbH & Co. KG», НТК «ИЭС им. Е. О. Патона», Экспоцентр «Наука» НАН Украины и НАК «Нафтогаз Украины». Выставки Недели поддержали Минпромполитики и Министерство топлива и энергетики Украины, Украинский союз промышленников и предпринимателей, Общество сварщиков Украины.

Всего в рамках экспозиции «Недели промышленных технологий», проходившей с 25 по 28 апреля, приняли участие около 500 компаний из 17 стран мира — Украины, Австрии, Германии, Италии, КНР, Македонии, Молдовы, Нидерландов, Польши, России, Румынии, Тайваня, Турции, Франции, Чехии, Швеции и Южной Кореи. Ощу-

тимая доля иностранных участников (почти 20% общего количества) свидетельствует об интенсивном развитии международного экономического сотрудничества в сфере повышения технологической зрелости отечественной экономики, а также о признании мировым сообществом значительного научно-технического и промышленного потенциала Украины. Посетители выставок получили возможность знакомства с почти 770 известными торговыми марками на общей площади экспозиции около 1500 м<sup>2</sup>.





## О ГЛАВНОМ

Цель прошедшей выставки «Сварка. Родственные технологии 2005» — инновационное развитие сварочных и родственных процессов и внедрение современных технологий в производство. По оценке академика Б. Е. Патона, высказанной им на открытии выставки «...достижения сварочной науки и техники влияют на современное состояние и тенденции развития мировой экономики».

В выставке «Сварка. Родственные технологии 2005» приняли участие около 60 организаций и фирм из семи стран (Австрия, Италия, Польша, Россия, Турция, Украина, Швеция). Среди участников выставки ИЭС им. Е. О. Патона, украинские предприятия «ДОНМЕТ», «КЗЭСО», «НАВКО-ТЕХ», фирма «СЭЛМА», российские — Государственный Рязанский приборный завод, «Джет», Межгосметиз-Мценск». Продукцию ведущих европейских компаний представляли фирмы «Askaynak», «Бинцель Украина», ESAB, «Кастолин-Украина», «Фрониус-Факел».

Выставка традиционно привлекла широкий круг специалистов, занятых непосредственно в сварочном произ-

водстве многих отраслей промышленности, в частности, в отечественном машино- и судостроении, металлургии, занимающихся предпринимательской деятельностью, работающих в среде образования.

Значительный интерес среди посетителей выставки вызвал «Каталог. Технологии, Материалы. Оборудование» Института электросварки. В нем на период весна-лето 2005 г. представлено около 300 разработок в области сварки, резки, наплавки, пайки и нанесения покрытий, пользующихся наибольшей востребованностью на рынке сварочного производства (заказать каталог можно через редакцию журнала «Автоматическая сварка»).

Одновременно с выставкой «Сварка. Родственные технологии 2005» проходила выставка «Трубопроводный транспорт 2005» — первая международная специализированная выставка труб, компрессоров, насосов и арматур, методов диагностики и ремонта. Совмещение этих событий вызвало дополнительное внимание специалистов и привлекло еще большее внимание профессионалов из всех регионов Украины.

## НОВИНКИ

К наиболее перспективным разработкам, представленным на выставке, следует отнести:

- ❖ технологию сварки металлических токопроводящих конструкций (стальных, из алюминиевых сплавов) с углеродистыми материалами, используемыми в металлургии, в частности цветной, в качестве электродов. Технология, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона, реали-





зуется с использованием мощных плазмотронов, работающих без защитных сред — на открытом воздухе;

❖ технологию сварки неповоротных стыков труб с использованием комбинированных процессов (TIG, MIG, MAG, с использованием самозащитных электродных проволок, специальных паст и флюсов).

Обращает внимание резкий рост разработок источников питания дуги с использованием преобразования частоты — инверторов. Если ранее разработки украинских производителей предлагались лишь для реализации при сварке штучными электродами, то сегодня, на рынок выходят разработки источников питания инверторного типа, предназначенные для применения при механизированных процессах. Можно полагать, что рынок сварочного оборудования с применением источников питания дуги инверторного типа в Украине может быть насыщен собственным производителем. Правда, это в основном относится к оборудованию малой мощности (до 200 А). Здесь также необходимо отметить появление в серийном производстве достаточно мощных чопперов («СЭЛМА», «ЭМИТА»). На ряде предприятий Украины налажен выпуск специальных комплектующих узлов для дугового механизированного сварочного оборудования (подающие механизмы, отсекатели и подогреватели газа, шланговые держатели и др. («КЗЭСО», ОАО «АРТЕМ-КОНТАКТ»). Примечательно, что предприятия, которые ранее специ-

ализировались на производстве сварочного оборудования, приходят к необходимости повышения эффективности применения процессов полуавтоматической сварки и наплавки. Появилось в серийном производстве оборудование, относящееся к так называемому классу оборудования малой механизации. К числу оригинальных разработок в этой области следует отнести различные транспортные средства (ОАО «АРТЕМ-КОНТАКТ»), а также колебатели сварочных горелок с программированием закона движения («СЭЛМА»). Представлено технически интересное эффективное устройство для подготовки кромок под сварку («СЭЛМА»). К числу новых разработок в области сварочного оборудования следует отнести, например полуавтомат («СЭЛМА») для подачи легкодеформируемых электродных проволок с тремя парами подающих и прижимных роликов.

Особо следует сделать акцент на разработках предприятия «ЭМИТА» (г. Донецк), среди которых выделяются столь необходимые в современном дуговом механизированном и автоматизированном оборудовании частотные электроприводы 3536В, а также весьма интересные технические решения по аккумуляторному полуавтомату, где в качестве источника используется комплект аккумуляторов.

### КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ

В рамках выставки «Сварка. Родственные технологии 2005» состоялся Международный научно-практический семинар «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта». На нем было заслушано свыше 50 докладов специалистов Украины и России по направлениям:

- ❖ оценка технического состояния систем трубопроводного транспорта;
- ❖ диагностика систем трубопроводного транспорта;
- ❖ технология ремонта и восстановления;
- ❖ трубопроводные арматуры;
- ❖ технологии, оборудование и материалы для сварки, резки и очистки труб;
- ❖ контроль качества сварных соединений;
- ❖ защита трубопроводов от коррозии;
- ❖ охрана труда;
- ❖ нормативно-техническая документация;
- ❖ подготовка кадров.

По мнению участников конференции, многие доклады, дискуссии по ним, кулуарные обсуждения свидетельству-





ют о полезности проведения подобных тематических семинаров.

Еще один семинар «Сварка алюминия и его сплавов: оборудование, материалы и новые технологии» был проведен специалистами ООО «Фрониус-Факел», на котором слушателей ознакомили с процессом дуговой сварки с импульсной подачей электродной проволоки. Этот процесс позволяет сваривать любой тонкий металл (начиная с толщины 0,3 мм), а также выполнять комбинированные соединения стали с алюминием (способ описан в нашем журнале № 12 за 2004 г.).

За четыре дня работы на выставке побывало около 3 тыс. представителей промышленных государственных и коммерческих организаций, научных сотрудников различных НИИ, преподавателей университетов, техникумов

и технических училищ, студентов и просто заинтересованных лиц. На протяжении всей выставки в огромном помещении выставочного комплекса, благодаря приветливости персонала, доброжелательности экспонентов, ярким и эффектно оформленным стендам и общему приподнятому настроению посетителей было по-настоящему тепло и уютно.

Именно на выставках закладываются основы взаимовыгодного сотрудничества между производителем и потребителем, именно здесь находят новых деловых партнеров и получают полезную и нужную информацию. Все это, несомненно, было и на выставке «Сварка. Родственные технологии 2005».

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук  
В. А. Лебедев, канд. техн. наук

## НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ



Исполнилось 70 лет известному ученому в области математических методов исследования сварочного материаловедения доктору технических наук, ведущему научному сотруднику Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ Олегу Георгиевичу Касаткину.

В 1966 г. О. Г. Касаткин был принят по конкурсу в ИЭС им. Е. О. Патона, где прошел путь от младшего научного сотрудника отдела математических методов исследований физико-химических процессов при сварке до заведующего лабораторией «Статистические методы моделирования и оптимизации сварочных процессов» (с 1982 г.). Основное направление научной деятельности Олега Георгиевича в этот период — свариваемость высокопрочных сталей, изучение зависимостей состав–структура–свойства сварных соединений, разработка соответствующих математических моделей. В 1990 г. он

защитил докторскую диссертацию на тему «Математическое исследование зависимостей состав – свойства сварных соединений и создание расчетно-экспериментальной системы для оптимизации основных технологических факторов сварки низколегированных конструкционных сталей». В настоящее время О. Г. Касаткин занимается вопросами, связанными с проблемами атомной энергетики Украины, в частности, прогнозированием ресурса и долговечности корпусов ядерных реакторов ВВЭР-1000. Ожидается получение более точных данных об оценке реальной склонности основного металла и сварных соединений корпуса реактора ВВЭР-1000 в активной зоне к радиационному охрупчиванию при длительных сроках эксплуатации.

О. Г. Касаткин — автор более 250 опубликованных работ, в том числе двух монографий. Он является членом двух специализированных ученых советов по защите диссертаций, входит в состав редколлегии академического журнала «Металлознавство та обробка металів».



В июне текущего года Феликсу Николаевичу Киселевскому, доктору технических наук, профессору, заведующему отделом Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины исполнилось 70 лет. Свою трудовую деятельность он начал в Киевском политехническом институте в 1961 г., где работал начальником Вычислительного центра, старшим преподавателем, доцентом, профессором.

С 1976 г. работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона заведующим отделом автоматизированных систем управления. Он является одним из ведущих научных специалистов в области автоматизации и роботизации технологических процессов сварки. С 1979 по 1991 гг. был Главным конструктором Минэлектротехпрома СССР по разработке и освоению в серийном производстве технологических роботов (в частности, сварочных). По его инициативе были организованы и успешно работали Совместная научно-исследовательская лаборатория по созданию сварочных роботов с Институтом технической кибернетики и робототехники Болгарской академии наук, а также совместное Научно-производственное объединение СЭЛТО (специальное электротехническое оборудование). Отдел, который возглавляет в настоящее время Ф. Н. Киселевский, является базовым отделом по созданию автоматизированных

систем управления технологическими процессами в сварке и смежных технологиях, математическому моделированию процессов сварки и созданию систем технического зрения для управления технологическими процессами.

К наиболее весомым работам Ф. Н. Киселевского относятся: создание принципов управления электронно-лучевыми установками для технологических процессов лучевой литографии (работа выполнялась впервые в мире и внедрена на предприятиях Минэлектротехпрома СССР), а также разработка адаптивных систем управления электронно-лучевыми установками при сварке тепловыделяющих элементов атомных реакторов; методов геометрической и технологической адаптации промышленных роботов для дуговой сварки; принципов построения систем сварки узлов двигателей ракетносителей в динамическом вакууме; принципов построения автоматизированных систем управления сваркой баков и корпусов ракетносителей. Особое место в разработках уделяется решению важных вопросов по обеспечению качества, надежности и эксплуатационной работоспособности сварных конструкций.

Ф. Н. Киселевским подготовлено более 50-ти кандидатов технических наук и опубликовано более 150 научных трудов, среди которых авторские свидетельства СССР, НРБ и патенты Украины.

Деятельность Ф. Н. Киселевского отмечена Орденом «За заслуги» III степени (2004 г.).