

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,  
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,  
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),  
Ю. Н. Ланкин,  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,  
В. Д. Позняков,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
П. Зайффарт (Германия)  
А. С. Зубченко (Россия)  
В. И. Лысак (Россия)  
Н. И. Никифоров (Россия)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Я. Пилярчик (Польша)  
Г. А. Туричин (Россия)  
Чжан Янмин (Китай)  
Д. фон Хофе (Германия)

**УЧРЕДИТЕЛИ:**

Национальная академия наук Украины,  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАНУ,  
Международная  
ассоциация «Сварка»

**ИЗДАТЕЛЬ:**

Международная ассоциация  
«Сварка»

**Адрес редакции:**

03680, Украина, Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАНУ  
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623  
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

**Редакторы:**

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина  
Электронная верстка:  
И. Р. Наумова,  
И. В. Петушков, А. И. Сулима

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788  
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечни  
утвержденных ВАК Украины  
и Российской Федерации изданий  
для публикации трудов  
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет  
Цена договорная

**СОДЕРЖАНИЕ**

Борис Патон — лауреат Международной энергетической премии  
«Глобальная энергия» ..... 3

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

*Кучук-Яценко С. И., Швец В. И., Швец Ю. В., Таранова Т. Г., Гордань  
Г. Н.* Причины образования трещин в зоне термического влияния  
литой высокомарганцевистой стали при контактной стыковой сварке ..... 5  
*Махненко В. И., Романова И. Ю.* Вероятностные характеристики  
сопротивляемости сварных соединений конструкционных сталей  
многоциклового усталости ..... 9  
*Рябцев И. А., Кондратьев И. А., Васильев В. Г., Жданов В. А., Баби-  
нец А. А.* Исследование структуры и эксплуатационных свойств  
наплавленного металла для восстановления и упрочнения  
прокатных валков ..... 14  
*Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Стефанов Б. В.* Влияние присадок  
олова на структуру и технологические свойства припоев системы  
Ag–Cu–Zn ..... 19  
*Письменный А. С., Прокофьев А. С., Письменный А. А., Новикова  
Д. П., Юхименко Р. В., Полухин В. В., Пташинская И. И., Полухин  
Ю. В.* Свойства сварных соединений трубных заготовок, полученных  
прессовой сваркопайкой с формирующим устройством ..... 25  
*Гедрович А. И., Ткаченко С. А., Гальцов И. А.* Оценка напряженно-  
деформированного состояния разнородных сварных соединений  
сталей 10X13Г18Д+09Г2С ..... 29

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

*Кучук-Яценко С. И., Качинский В. С., Иенатенко В. Ю., Гончаренко  
Е. И., Коваль М. П.* Прессовая сварка магнитоуправляемой дугой  
труб из стали Х70 ..... 33  
*Савицкий М. М., Письменный А. С., Савицкая Е. М., Притула С. И.,  
Бабенко С. К.* Технология и оборудование для производства  
корпусов баллонов высокого давления из листового проката ..... 36  
*Зайффарт П. И.* Современное оборудование для судостроения ..... 43  
*Первухин Л. Б., Первухина О. Л., Бондаренко С. Ю.* Очистка и  
активация свариваемых поверхностей в процессе сварки взрывом ..... 46

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

Диссертации на соискание ученой степени ..... 50  
По страницам журнала «Welding and Cutting» 2009, № 6 ..... 54

**ХРОНИКА**

8-я Международная конференция «Лучевые технологии» ..... 57  
XIV Международная специализированная выставка «Сварка 2010» ..... 59  
Пятая Международная конференция «Математическое модели-  
рование и информационные технологии в сварке и родственных  
процессах» ..... 61  
Сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по  
естественным наукам Международной ассоциации академий наук ..... 62  
Специализированный форум «Патон Экспо 2010» ..... 64  
Памяти проф. П. Зайффарта ..... 65

ИНФОРМАЦИЯ ..... 66

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
**B. E. PATON**

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

THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)  
D. von Hofe (Germany)  
Guan Qiao (China)  
U. Dilthey (Germany)  
P. Seyffarth (Germany)  
A. S. Zubchenko (Russia)  
V. I. Lysak (Russia)  
N. I. Nikiforov (Russia)  
B. E. Paton (Ukraine)  
Ya. Pilarczyk (Poland)  
G. A. Turichin (Russia)  
Zhang Yanmin (China)

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»  
Address of Editorial Board:  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23  
Fax: (38044) 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

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

Boris Paton is the winner of Global Energy International Prize ..... 3

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Kuchuk-Yatsenko S. I., Shvets V. I., Shvets Yu. V., Taranova T. G., Gordan G. N.* Causes of crack formation in heat-affected zone of cast high-manganese steel in flash-butt welding ..... 5  
*Makhnenko V. I., Romanova I. Yu.* Probability characteristics of resistance of welded joints of structural steels to multi-cyclic fatigue ..... 9  
*Ryabtsev I. A., Kondratiev I. A., Vasiljev V. G., Zhdanov V. A., Babinets A. A.* Investigation of structure and service properties of deposited metal for restoration and strengthening of mill rolls ..... 14  
*Khorunov V. F., Maksymova S. V., Stefaniv B. V.* The effect of tin fillers on structure and technological properties of brazing alloys of Ag-Cu-Zn system ..... 19  
*Pismennyi A. S., Prokofiev A. S., Pismennyi A. A., Novikova D. P., Yukhimenko R. V., Polukhin V. V., Ptashinskaya I. I., Polukhin Yu. V.* Role of forming device on structure and phase composition of joints produced in press butt braze welding ..... 25  
*Gedrovich A. I., Tkachenko S. A., Galtsov I. A.* Evaluation of stress-strain state of dissimilar welded joints of steels 10Kh13G18D+09G2S ..... 29

### INDUSTRIAL

*Kuchuk-Yatsenko S. I., Kachinsky V. S., Ignatenko V. Yu., Goncharenko E. I., Koval M. P.* Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of X70 steel ..... 33  
*Savitsky M. M., Pismennyi A. S., Savitskaya E. M., Pritula C. I., Babenko S. K.* Technology and equipment for manufacture of high-pressure cylinder bodies of sheet rolled metal ..... 36  
*Seyffarth P. I.* Modern equipment for ship building ..... 43  
*Pervukhin L. B., Pervukhina O. L., Bondarenko S. Yu.* Cleaning and activation of surfaces being welded in the process of explosion welding ..... 46

### BRIEF INFORMATION

Theses for scientific degree ..... 50  
Review of journal «Welding and Cutting», 2009, 6 ..... 54

### NEWS

The 8th International Conference «Beam Technologies» ..... 57  
The XIV International Specialized Exhibition «Welding 2010» ..... 59  
The 5th International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes» ..... 61  
Session of the Scientific Council on new materials at the Committee on natural sciences of the International Association of Academies of Sciences ..... 62  
The Specialized Forum «Paton Expo 2010» ..... 64  
In memory of prof. P. Seyffarth ..... 65

INFORMATION ..... 66

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.

---

## **БОРИС ПАТОН — ЛАУРЕАТ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРЕМИИ «ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ»**

*Премия «Глобальная энергия» учреждена в 2002 г. Идея ее создания была выдвинута группой известных российских ученых, поддержана крупнейшими энергетическими компаниями, одобрена Президентом России. Она — одна из наиболее престижных международных премий, присуждаемых за выдающиеся научные достижения в области энергетики ежегодно с 2003 г.*

18 июня Президент России Дмитрий Медведев в Санкт-Петербурге вручил престижную международную премию «Глобальная энергия» академикам Борису Патону и Александру Леонтьеву. Торжественная церемония прошла в рамках Петербургского международного экономического форума.



Выступление академика Бориса Патона на церемонии награждения

Борис Патон удостоен почетной награды «За выдающийся вклад в решение научно-технических проблем трубопроводного транспорта энергоносителей и энергомашиностроения», а россиянин Александр Леонтьев — «За фундаментальные исследования в области интенсификации процесса теплообмена в энергетических установках».

Академик Борис Патон признан выдающимся научным лидером учеными украинской, российской и мировой науки. Закончив Киевский политехнический институт в 1941 г. по



Награждение Президентом РФ Дмитрием Медведевым академика Бориса Патона

специальности инженер-электрик, он сразу же начал работать в оборонном производстве, сначала на заводе «Красное Сормово» в г. Горьком (ныне Нижний Новгород), а затем в Институте электросварки, который был эвакуирован в Нижний Тагил на «Уралвагонзавод».

Продолжив дело своего отца, легендарного Евгения Патона, он сумел сделать несколько принципиальных изобретений в области электросварки, принимал активное участие в совершенствовании и распространении скоростной автоматической сварки под флюсом в танкостроении и производстве вооружений, заложил основы нового науч-

ного направления — автоматического регулирования процессами сварки. Борис Патон создал принципиально новый способ сварки — электрошлаковый, с помощью которого решена задача производства уникальных сосудов высокого давления для тепловой, атомной и гидроэнергетики, химической промышленности, крупногабаритных узлов морских судов.

Уже через 10 лет после окончания вуза Борис Патон становится членом-корреспондентом, еще через 7 лет — академиком АН УССР, а еще через 4 года — академиком АН СССР.

Вот уже 48 лет академик Борис Патон возглавляет Национальную академию наук Украины и с 1993 г. — Международную ассоциацию академий наук.

«Академик Патон внес огромный вклад во всех аспектах энергетики», — заявил вице-президент РАН, академик Николай Лавёров. — Его деятельность играет исключительную роль в энергетике СНГ и вообще в обеспечении топливом самых разных стран мира. Благодаря его работам по сварке труб обеспечивается надежное снабжение энергией миллионов людей».

Результаты научной, инженерной и организационной деятельности академика Бориса Патона представляют собой крупнейший вклад в решение глобальных проблем энергетики — трубопроводного транспорта энергоносителей, тепловой, атомной и гидроэнергетики, оборонной техники, использования нетрадиционных видов энергии. Достигнутые им результаты являются уникальными по своему техническому уровню и масштабам применения для обеспечения энергией многих стран, а также служат улучшению здоровья человека и среды его обитания.

Сердечно поздравляем дорогого Бориса Евгеньевича с высокой оценкой его труда и желаем ему крепкого здоровья, новых творческих достижений, успехов и благополучия.



Лауреаты премии «Глобальная энергия» за 2010 г. — академики Борис Патон и Александр Леонтьев

Редколлегия журнала



## ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ЛИТОЙ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **В. И. ШВЕЦ**, канд. техн. наук, **Ю. В. ШВЕЦ**, инж., **Т. Г. ТАРАНОВА**, **Г. Н. ГОРДАНЬ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования причин появления трещин в зоне термического влияния литой высокомарганцевистой стали 110Г13Л при контактной стыковой сварке с аустенитной сталью 08Х18Н10Т. Показано, что образование трещин вызвано ликвационной неоднородностью распределения фосфора, которая происходит как при кристаллизации отливок, так и в твердом растворе в термодинамических условиях сварки. Для предотвращения образования трещин рекомендуется уделять особое внимание процессу гомогенизационного отжига отливок стали 110Г13Л.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, пульсирующее оплавление, высокомарганцевистая сталь 110Г13Л, аустенитная вставка, крестовина, зона термического влияния, ликвация фосфора, трещины

Крестовины являются одним из наиболее ответственных элементов железнодорожного пути. При их производстве в мировой практике широко используют сварные конструкции. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология и оборудование для сварки железнодорожных крестовин в промышленных условиях [1]. В основу этой технологии положен способ контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением [2], при котором выполняют соединение сердечника из высокомарганцевистой стали 110Г13Л с рельсовой М76 через промежуточную вставку из хромоникелевой аустенитной стали 08Х18Н10Т.

При выходном контроле некоторых партий сварных крестовин в ряде случаев после полной механической обработки в околошовной зоне стали 110Г13Л на участке подошвы выявлены трещины (рис. 1), которые явились причиной отбраковки готового изделия.

Целью данной работы является установление причин появления трещин в стали 110Г13Л и разработка мероприятий по их предотвращению.

Контактную стыковую сварку выполняли на сварочной машине К924М, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона, на режиме, принятом для промышленного производства. Продолжительность процесса сварки составляла 90...110 с, припуск на сварку (3,0 + 1,5) мм, ширина вставки в сварном соединении 18...20 мм.

Для выявления причины растрескивания проведены анализ микроструктуры и химической неоднородности зоны термического влияния (ЗТВ) соединения стали 110Г13Л. Рассмотрены участок

соединения с трещиной и участок, примыкающий к нему, без растрескивания.

Исследования проводили на оптическом микроскопе «Неофот-32», микроскопе-микроанализаторе SX-50 фирмы «Camebax», растровом электронном микроскопе JSM-840 с микроанализатором «Lynk-systems». Микроструктуру выявляли электролитическим травлением в 10%-м водном растворе тиосульфата аммония.

Спектральный анализ химического состава стали 110Г13Л, используемой при изготовлении крестовин, соответствовал ГОСТ 2176-77 (табл. 1). При этом содержание фосфора и серы было значительно ниже допустимого стандартом.

При анализе макроструктуры (рис. 1) установлено, что разрушение металла во всех случаях происходит в слое шириной около 0,5 мм, который располагается параллельно линии соединения на расстоянии около 1,5...2,0 мм. Растрескивание носит межзеренный характер, т. е. сосредоточено на границах аустенитных зерен стали 110Г13Л.

Исследование показало, что металл соединения стали 110Г13Л имеет устойчивую аустенитную структуру с единичными включениями кар-

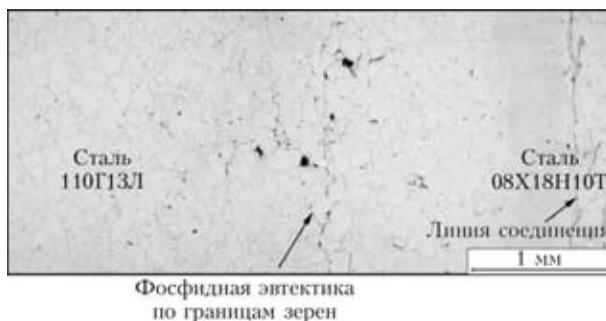


Рис. 1. Макроструктура участка сплавления стали 110Г13Л со сталью 08Х18Н10Т в сварном соединении крестовины



Таблица 1. Химический состав (мас. %) стали 110Г13Л

Источник	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
ГОСТ 2176-77	0,9...1,4	11,5...15	0,3...1,0	≤0,05	≤0,12	≤3,80	≤0,70	≤0,3
Микрорентгеноспектральный анализ	0,92...0,95	12,3...12,7	0,46	0,021...0,023	0,033...0,036	Не опр.	Не опр.	Не опр.

бидов и значительным количеством неметаллических включений. Под воздействием сварочного термического цикла в металле ЗТВ сначала происходит измельчение, а в приконтактном слое в результате собирательной рекристаллизации — увеличение размера аустенитных зерен. В переходной зоне на контактной границе стали 110Г13Л со сталью 08Х18Н10Т формируется аустенитная структура с прочностными свойствами на уровне основного металла (рис. 2). На участке ЗТВ на расстоянии около 1,5...2,0 мм от линии соединения по границам зерен присутствует некоторая структурная составляющая, наличие которой, очевидно, и вызывает растрескивание. В местах с большим содержанием этой структурной составляющей от границ зерен формируется игольчатая фаза (рис. 3).

Для выяснения природы образования этой структурной составляющей проведен анализ не-

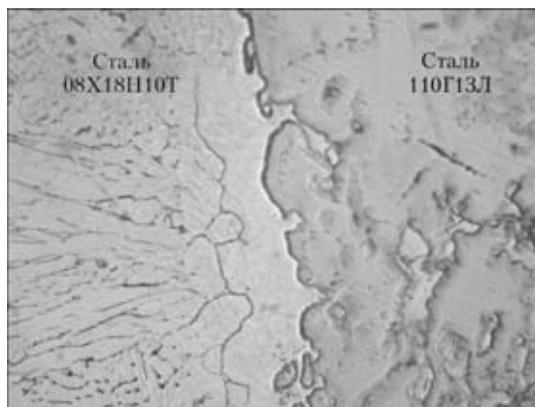


Рис. 2. Микроструктура (X400) переходной зоны на контактной линии сплавления стали 110Г13Л со сталью 08Х18Н10Т

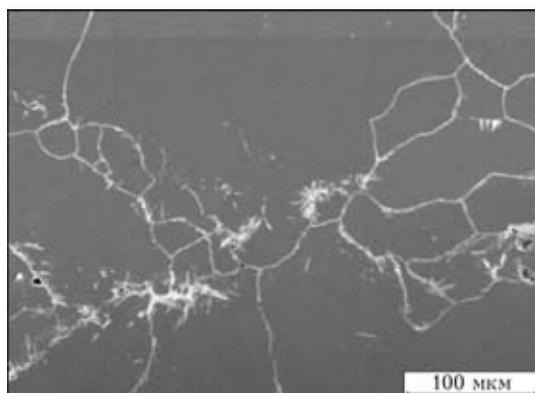


Рис. 3. Микроструктура ЗТВ стали 110Г13Л на участке с фосфидной эвтектикой

металлических включений стали 110Г13Л. Установлено, что сталь содержит значительную объемную долю комплексных сульфидов (рис. 4, а, б), центральную часть которых составляет сульфид алюминия, периферийную — сульфиды марганца и железа. Имеются также отдельные включения сульфида алюминия. Встречаются неоднородно распределенные в объеме скопления мелких включений нитридов правильной геометрической формы, а также, возможно, карбонитридов титана (рис. 4, в). Включения фосфидов отсутствуют. Это согласуется с результатами ранее проведенных исследований, в ходе которых установлено,

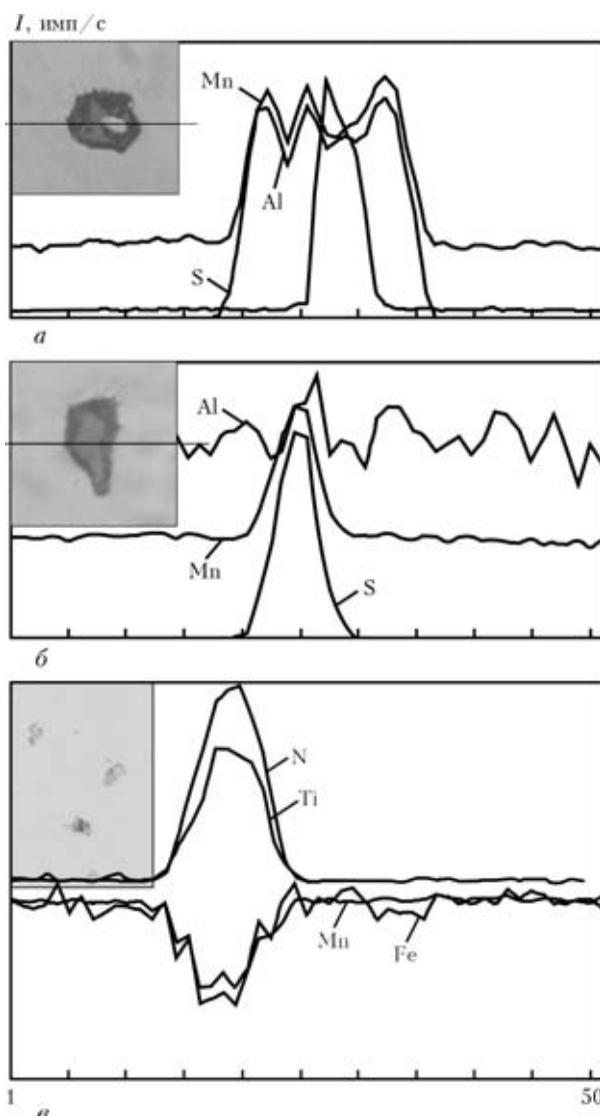


Рис. 4. Распределение химических элементов в сульфидах (а, б) и нитридах (в) стали 110Г13Л (I — импульс излучения; шаг 1,02 мкм)



**Т а б л и ц а 2.** Результаты микрорентгеноспектрального анализа химического состава (мас. %) новой структурной составляющей слоя с микротрещинами в стали 110Г13Л

№ п/п	P	Si	Mn	Cr	Fe	C
1	12,040	0,434	29,826	0,438	52,182	5,054
2	2,234	0,659	21,361	0,213	73,352	2,181
3	1,298	0,634	18,148	0,163	78,561	1,195
4	3,534	0,672	21,936	0,214	71,428	2,204

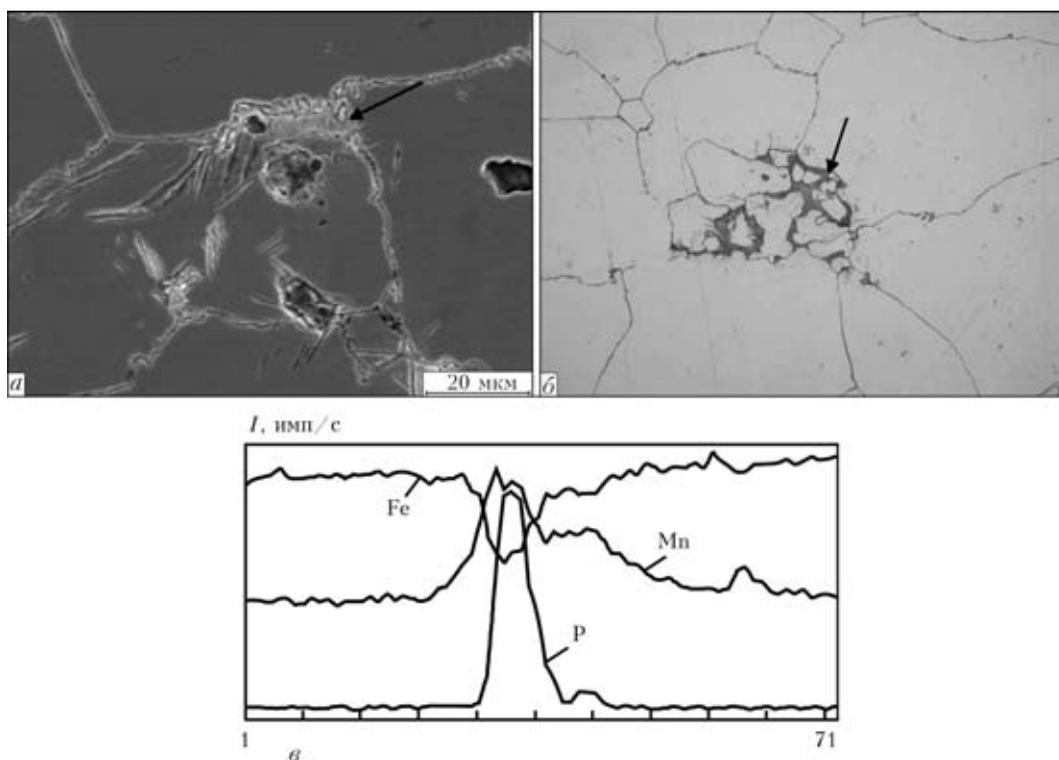
что даже при содержании 0,1 мас. % P в стали 110Г13Л не удалось обнаружить фосфиды [3].

Анализ трансформации неметаллических включений в ЗТВ показал, что высокотемпературные нитриды остаются стабильными до температуры плавления стали. Включения сульфидов изменяются мало по сравнению с таковыми в основном металле, по крайней мере, на участке слоя с новообразованной структурной составляющей. Таким образом, загрязненность неметаллическими включениями стали 110Г13Л не является источником образования указанной составляющей.

Согласно кривым распределения химических элементов (рис. 5) при переходе через межзеренные границы с новой структурной составляющей имеет место повышение содержания марганца и фосфора. При анализе химического состава доступных для исследования микрообъемов на стыке трех зерен установлено, что содержание фосфора и марганца составляет соответственно 12,040 и 29,826 мас. % (табл. 2, № 1).

Это дает основание заключить, что растрескивание вызывается описанным в литературе процессом формирования в марганцовистых сталях легкоплавкой фосфидной (карбофосфидной при высоком содержании углерода) эвтектики, охрупчивающей границы зерен [4].

При содержании фосфора в стали 110Г13Л 0,033...0,043 мас. % причиной образования фосфидной эвтектики, очевидно, является локальное повышение концентрации этого элемента, вызванное неоднородностью его распределения. Последняя может быть результатом прежде всего первичной ликвации — фосфор значительно расширяет температурный интервал кристаллизации стали. Дополнительно при сварке в зоне термомодеформационного воздействия возможна ликвация в железе поверхностно-активного фосфора в твердой фазе и обогащение им границ зерен. Это, очевидно, происходит в слое ЗТВ на расстоянии 1,5...2,5 мм от линии соединения, где при сварке температура ориентировочно составляет 900...1000 °С.



**Рис. 5.** Карбофосфидная эвтектика в микроструктуре стали 110Г13Л (обозначена стрелками): *а* — электронно-микроскопическое изображение; *б* — оптическое изображение (×400); *в* — распределение химических элементов в зоне карбофосфидной эвтектики (шаг 2 мкм)



Известно, что температура эвтектической реакции  $\delta \rightarrow \gamma\text{-Fe} + (\text{Fe, Mn})_2\text{P}$  в системе Fe–Mn–P составляет около 950 °С [5]. Увеличение содержания фосфора и марганца на границах зерен вызывает их концентрационное оплавление, после чего получает развитие процесс формирования эвтектической фазы. В расплав активно диффундирует марганец, фосфор, а также углерод, поскольку растворимость в жидкой фазе на несколько порядков выше, чем в твердой.

Кристаллизация образовавшегося межзеренного расплава происходит с образованием фосфидной эвтектики и игольчатых карбидов, растущих от границ зерен.

В слое ЗТВ стали 110Г13Л шириной до 1,5 мм, примыкающем к линии соединения, тепловое воздействие соответствует гомогенизационному отжигу. Концентрационная неоднородность фосфора и марганца на этом участке устраняется — межзеренные эвтектические прослойки в микроструктуре отсутствуют.

На более удаленных участках ЗТВ диффузионная подвижность недостаточна для достижения на границах зерен концентрации фосфора, при которой происходит оплавление.

Таким образом, результаты исследования показали, что в металле ЗТВ стали 110Г13Л на расстоянии 1,5...2,0 мм от линии соединения при контактной стыковой сварке возникают условия для формирования фосфидной эвтектики. Поскольку ее образование происходит нерегулярно, следует предположить, что основной причиной ее появления при среднем содержании фосфора в стали 0,033...0,036 мас. % является неоднородность его распределения. Достижение однородного распределения фосфора в стали 110Г13Л затруднено из-за его малой диффузионной подвижности в железе. Один из путей достижения однородного распределения фосфора — строго

придерживаться установленного режима гомогенизационного отжига отливок стали 110Г13Л; другой — снижение содержания фосфора. Для предотвращения трещин в марганцовистых сталях рекомендованное содержание фосфора должно составлять менее 0,02 мас. % [4, 5].

## Выводы

1. При изготовлении железнодорожных крестовин контактной стыковой сваркой в металле ЗТВ стали 110Г13Л на расстоянии 1,5...2,5 мм от линии соединения возможно образование легкоплавких межзеренных прослоек фосфидной эвтектики, вызывающих растрескивание.

2. Образование межзеренных прослоек фосфидной эвтектики при содержании фосфора 0,033...0,036 мас. % вызвано ликвационной неоднородностью его распределения при кристаллизации отливок.

3. Для предотвращения образования межзеренных прослоек фосфидной эвтектики в ЗТВ стали 110Г13Л необходимо строго придерживаться установленного режима гомогенизационного отжига отливок стали 110Г13Л.

1. *ТУ У ДП 32-4520.13.500-007-2002:2006*. Хрестовини та осереддя з привареними рейковими закінченнями типу Р65, Р50 та USC60 через вставку або без неї. Дослідна партія. — Чинне з 01.01.2003 до 01.01.2006.
2. *Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку* / С. И. Кучук-Яценко, Ю. В. Швец, Е. А. Думчев и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 6–9.
3. *Ершов Г. С., Позняк Л. А.* Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1998. — 381 с.
4. *Кондратюк С. Е., Касаткин О. Г.* Разрушение литой марганцовистой стали. — Киев: Наук. думка, 1987. — 148 с.
5. *Гудремон Э.* Специальные стали: В 2 т. Т.2. — М.: Металлургиздат, 1960. — 1526 с.

Investigation results are presented on the causes of cracks forming in HAZ of cast high-manganese steel 110G13L in its flash butt welding to austenitic steel 08Kh18N10T. It is shown that cracking is caused by the segregation heterogeneity of distribution of phosphorus, which takes place both in solidification of castings and in solid solution under thermal-deformation welding conditions. To prevent cracking, it is recommended to pay a special attention to the process of homogenising annealing of the 110G13L steel castings.

Поступила в редакцию 25.01.2010



# ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **И. Ю. РОМАНОВА**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены вопросы вероятностного определения сопротивляемости сварных соединений усталостному разрушению при многоциклового усталости. Проведен анализ вероятности безотказной работы соединений для различных типов приложенных нагрузок при изменяющихся величинах.

*Ключевые слова:* сварные соединения, циклическое нагружение, многоцикловая усталость, сопротивляемость усталости, вероятностные методы прогнозирования, безопасная эксплуатация

В последние годы возрастает интерес к вероятностным методам оценки наступления предельного состояния сварных соединений при различных нагрузках, что в значительной степени связано с большим количеством факторов, имеющих место в зоне соединения и влияющих на наступление предельного состояния. Это особенно актуально при переменных нагрузках и усталостных разрушениях сварных соединений. Наличие множества факторов, трудно поддающихся детерминированному описанию, обуславливает достаточно большие разбросы при испытаниях на усталость сварных соединений.

Использование стохастических методов расчета на усталость сварных соединений требует четких представлений относительно вероятностных характеристик сопротивляемости сварных соединений различных конструкционных материалов усталостным разрушениям. Такие характеристики для отдельных сварных соединений и материалов (в основном конструкционных сталей) в виде размаха изменения нормальных номинальных напряжений  $\Delta\sigma$  и вероятности разрушения получены экспериментальным путем [1–3] и др.

Работы Международного института сварки (МИС) [4], посвященные многоциклового усталости различных типов сварных соединений конструкционных сталей ферритно-перлитного класса прочностью до 900 МПа, показали, что при вероятности отказа  $Q_B = 5 \cdot 10^{-2}$  (вероятность неразрушения  $9,5 \cdot 10^{-1}$ ) сопротивляемость усталостному разрушению достаточно надежно описывается с помощью минимальных размахов номинальных напряжений  $FAT$  на базе  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл. При этом допускаемые размахи при регулярном

циклическом нагружении определяются зависимостью [4]

$$[\Delta\sigma] = FAT \frac{f_1(N)f_2(R)}{\gamma_m f_3(\delta)}, \quad (1)$$

где  $f_1(N)$ ,  $f_2(R)$ ,  $f_3(\delta)$  — соответственно поправки на долговечность  $N$ , асимметрию цикла  $R$ , свариваемую толщину изделия  $\delta$  (при  $N < 2 \cdot 10^6$  цикл,  $R \geq 0,5$  и  $\delta > 25$  мм каждая из этих поправок имеет значение больше 1,0);  $\gamma_m$  — фактор безопасности, равный 1,0...1,4, т. е. при  $f_1 = f_2 = f_3 = 1$  и  $\gamma_m = 1$  вероятность отказа гарантируется на уровне приблизительно 0,05.

Естественно, что при  $\gamma_m > 1$  безопасность возрастает, а вероятность отказа в результате усталостного разрушения резко снижается.

С учетом рекомендаций МИСа [4] представляет большой интерес для практики дополнить их данными о вероятности разрушения при различных значениях  $FAT$  и классов соединений  $K_x$  в зависимости от требуемой долговечности  $N$  и уровня нагрузки  $\Delta\sigma$ . С этой целью можно использовать уже опубликованные экспериментальные результаты относительно вероятности разрушения различных типов сварных соединений, связав эти данные с рекомендациями работы [4]. Поиск соответствующих опубликованных данных привел к созданию в 1987 г. шведской фирмой «Svenskt stal» руководства по проектированию (расчету на прочность) сварных узлов из высокопрочных (EHS) и абразивостойких (AR) сталей для оборудования типа экскаваторов, самосвалов, шахтного, лесоповального оборудования и др. [5]. Стали (особенно типа EHS) вполне соответствуют таковым в работе [4], набор сварных соединений в [5] также соответствует таковым в [4], однако при этом используют иную классификацию, при которой класс соединения определяется отношением  $K_x = 315/\sigma_r$ , где  $\sigma_r$  — максимальное нап-

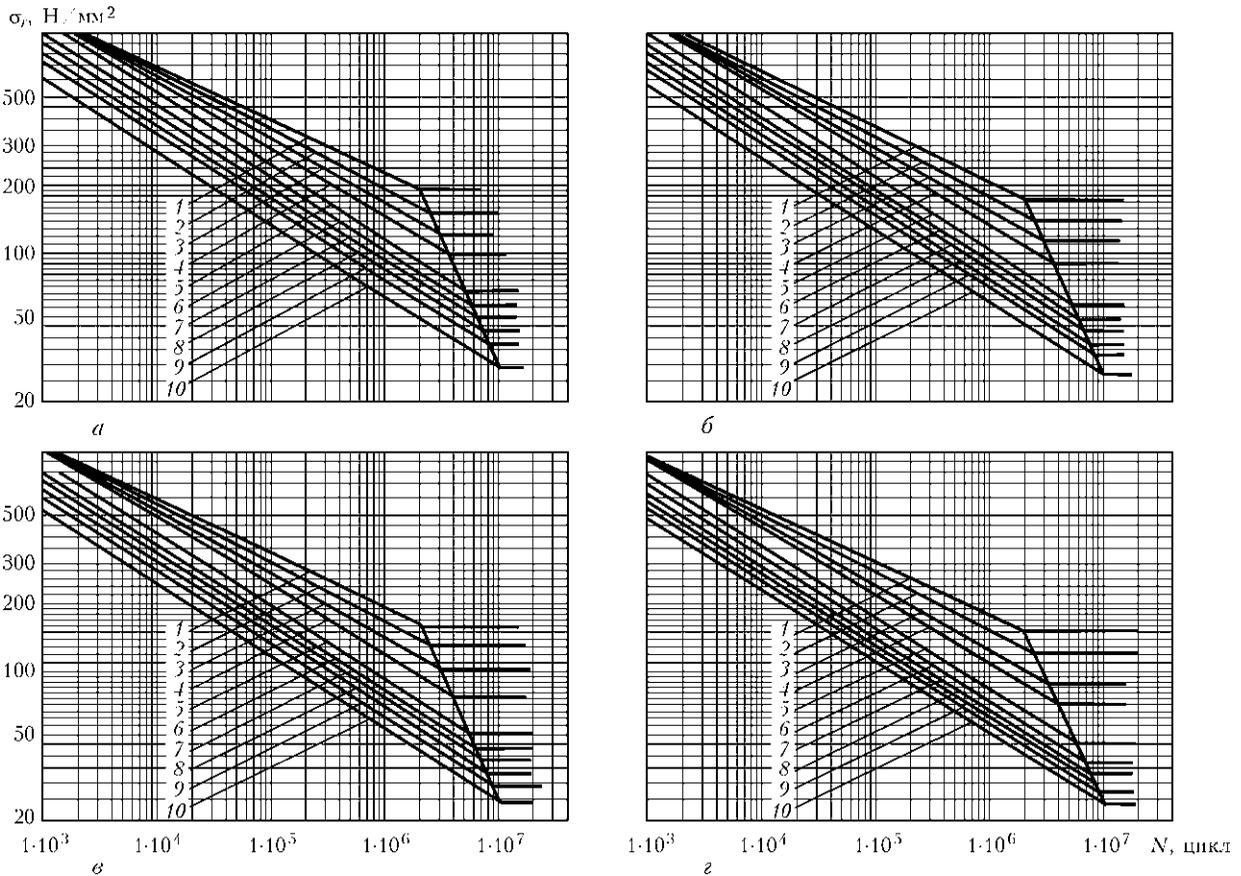


Рис. 1. Экспериментальные данные [5] по сопротивлению усталости сварных соединений различных типов при вероятности  $Q_B = 1 \cdot 10^{-2}$  (а),  $1 \cdot 10^{-3}$  (б),  $1 \cdot 10^{-4}$  (в),  $1 \cdot 10^{-5}$  (г) и  $K_x = 1,3$  (1), 1,5 (2), 1,7 (3), 2,0 (4), 2,3 (5), 2,6 (6), 3,0 (7), 3,5 (8), 4,0 (9), 5,0 (10)

ряжение при  $R = 0$ , т. е.  $\sigma_r \approx \Delta\sigma$ . На рис. 1 и в табл. 1 приведены данные о различных значениях вероятностей отказа  $Q_B$ ,  $K_x$ , долговечности  $N$ ,  $\sigma_r = \Delta\sigma$  при  $R = 0$ , что соответствует

$$\sigma_r = FAT f_2(R) f_4(Q_B), \quad (2)$$

где  $f_2$  — поправка на коэффициент асимметрии цикла  $R$  по [4] при  $R = 0$   $f_2(R) = 1,2$ ;  $f_4(Q_B)$  — поправка, связанная с вероятностью  $Q_B$ , отличной от 0,05, соответствующей  $FAT$  по [4].

Для описания  $Q_B$  предлагаю использовать трехпараметрический закон Вейбулла в виде

$$Q_B = \left( \frac{\Delta\sigma - A}{B} \right)^\eta, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma > A$  (здесь  $A, B, \eta$  — параметры этого закона, зависящие от  $K_x$  (либо  $FAT$ ) и  $N$ . Их можно определить с помощью данных табл. 1. Достаточно хорошее согласование получено при  $\eta = 4$ . Расчеты значений  $A$  и  $B$  в зависимости от долговечности  $N$  и класса соединения  $FAT$  представлены на рис. 2.

Покажем степень согласованности расчета  $Q_B$  по (2) с экспериментальными данными табл. 1,

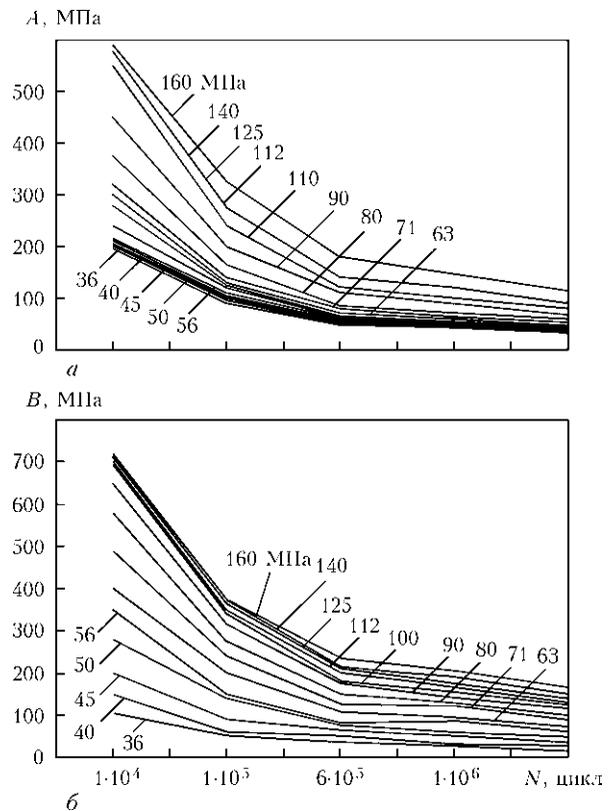


Рис. 2. Зависимость параметров уравнения Вейбулла  $A$  (а) и  $B$  (б) от долговечности  $N$  и класса соединения от 36 до 160 МПа



Таблица 1. Максимальное напряжение  $\sigma_r$  (Н/мм<sup>2</sup>) по данным работы [5]

N, цикл	$K_x$									
	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,5	4,0	5,0
$Q_B = 1 \cdot 10^{-2}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	900	900	900	800	720	600
$1 \cdot 10^4$	690	680	620	580	540	460	420	370	340	280
$1 \cdot 10^5$	400	350	325	290	245	220	195	175	160	135
$6 \cdot 10^5$	260	220	195	170	138	120	110	100	87	74
$1 \cdot 10^6$	220	190	168	142	115	103	92	83	75	62
$2 \cdot 10^6$	185	160	138	115	93	80	73	65	58	48
$Q_B = 1 \cdot 10^{-3}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	900	856	781	705	655	554
$1 \cdot 10^4$	636	598	559	529	450	398	362	327	304	257
$1 \cdot 10^5$	357	321	289	258	209	184	168	152	141	119
$6 \cdot 10^5$	228	197	176	147	115	101	93	84	78	66
$1 \cdot 10^6$	201	172	149	125	97	86	78	71	66	55
$2 \cdot 10^6$	169	143	123	101	77	68	62	56	52	44
$Q_B = 1 \cdot 10^{-4}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	900	800	710	650	600	520
$1 \cdot 10^4$	600	560	520	490	410	360	340	300	280	240
$1 \cdot 10^5$	340	300	270	240	190	170	158	140	130	112
$6 \cdot 10^5$	215	185	160	137	107	95	87	78	70	63
$1 \cdot 10^6$	185	160	140	115	87	80	73	65	58	53
$2 \cdot 10^6$	160	135	114	94	70	64	57	52	47	42
$Q_B = 1 \cdot 10^{-5}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	781	692	642	592	554	491
$1 \cdot 10^4$	557	514	481	450	363	322	298	275	257	228
$1 \cdot 10^5$	312	276	249	219	168	149	138	128	119	106
$6 \cdot 10^5$	199	170	150	125	93	82	76	70	66	58
$1 \cdot 10^6$	176	148	129	107	78	69	64	59	55	49
$2 \cdot 10^6$	148	123	106	86	62	55	51	47	44	39

использовав указанную выше зависимость между  $K_x$  и  $FAT$  в виде

$$FAT(K_x) = \sigma_r(K_x, Q_B = 5 \cdot 10^{-2}, N = 2 \cdot 10^6) / 1,2, \quad (4)$$

а также данные табл. 1 и зависимость (3).

Полученные результаты приведены в табл. 2. Они показывают, что экспериментальные данные по [5] для  $\sigma_r$  из табл. 1 и расчетные данные на основе (3) при разных значениях параметров  $A$  и  $B$  при  $Q_B = 1 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-3}, 1 \cdot 10^{-4}, 1 \cdot 10^{-5}$  достаточно хорошо согласуются.

Особый интерес представляет вопрос о том, как расчет по допустимой вероятности разрушения согласуется с расчетом по заданному значению фактора безопасности  $\gamma_m = 1,0 \dots 1,4$ , рекоменду-

мому в работе [4]. В табл. 3 приведены такие данные, полученные для сварных соединений с различным значением  $K_x$  [5] и соответствующим  $FAT$  [4] для долговечности  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0$ .

Из табл. 3 видно, что относительно небольшое изменение  $\gamma_m$  резко влияет на значения  $Q_B$ , т. е. при разумных рисках отказа в пределах  $Q_B = 1 \cdot 10^{-4}$  необходимость в  $\gamma_m > 1,64$  невелика. Соответственно при  $\gamma_m = 1,4$  вероятность отказа для рассматриваемых условий составляет  $1 \cdot 10^{-3}$ .

Следует отметить, что в большинстве случаев вероятность отказа  $Q_B$  определяет риск возникновения усталостной макротрещины, после чего наступает период ее роста до критических раз-



Таблица 2. Сопоставление экспериментальных данных из табл. 1 с расчетными (3) для  $\sigma_r$  (МПа) при  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл и средних значениях параметров  $A$  и  $B$

$Q_B$	$K_x$									
	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,5	4,0	5,0
$1 \cdot 10^{-2}$	$\frac{185}{192}$	$\frac{160}{166}$	$\frac{138}{141}$	$\frac{115}{120}$	$\frac{93}{95}$	$\frac{80}{84}$	$\frac{73}{75}$	$\frac{65}{67}$	$\frac{58}{60}$	$\frac{48}{50}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$\frac{169}{170}$	$\frac{143}{145}$	$\frac{123}{124}$	$\frac{101}{102}$	$\frac{77}{78}$	$\frac{68}{70}$	$\frac{62}{63}$	$\frac{56}{57}$	$\frac{52}{52}$	$\frac{44}{44}$
$1 \cdot 10^{-4}$	$\frac{160}{158}$	$\frac{135}{133}$	$\frac{114}{113}$	$\frac{94}{93}$	$\frac{70}{69}$	$\frac{64}{62}$	$\frac{57}{56}$	$\frac{52}{51}$	$\frac{47}{47}$	$\frac{42}{41}$
$1 \cdot 10^{-5}$	$\frac{148}{151}$	$\frac{123}{126}$	$\frac{106}{108}$	$\frac{86}{87}$	$\frac{62}{63}$	$\frac{55}{57}$	$\frac{51}{52}$	$\frac{47}{48}$	$\frac{44}{45}$	$\frac{39}{40}$

Примечание. В числителе приведены данные по [5], в знаменателе — расчетные по формуле (3).

Таблица 3. Вероятность отказа  $Q_B$  и соответствующие значения фактора безопасности  $\gamma_m$  для  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл при  $R = 0$

$K_x$	FAT, МПа	$Q_B = 5 \cdot 10^{-2}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-2}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-3}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-4}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-5}$	
		$\Delta\sigma$ , МПа	$\gamma_m$								
1,7	135	161,9	1,0	138	1,17	123	1,32	114	1,42	106	1,53
2,0	116	139,5	1,0	115	1,21	101	1,38	94	1,48	86	1,62
2,3	95	114,6	1,0	93	1,23	77	1,49	70	1,64	62	1,85
2,6	84	100,6	1,0	80	1,26	68	1,48	64	1,58	55	1,83
3,0	74	89,00	1,0	73	1,22	62	1,43	57	1,56	51	1,74
3,5	65	78,00	1,0	65	1,20	56	1,39	52	1,50	47	1,66
4,0	58	68,70	1,0	58	1,18	52	1,32	47	1,46	44	1,56
5,0	46	55,60	1,0	48	1,16	44	1,26	42	1,32	39	1,42

меров, при которых происходит переход к спонтанному разрушению. Таким образом, рекомендуемые в работе [4] значения  $\gamma_m = 1,0 \dots 1,4$ , соответствуют вероятности возникновения усталостной трещины  $Q_B = 5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ , что в зависимости от тяжести ожидаемых последствий [4] является вполне обоснованным.

Возможность получения количественных характеристик относительно вероятности зарождения усталостных трещин для отдельных сварных соединений более обоснованно позволяет оценивать возможность безопасной эксплуатации отдельных узлов с большим количеством сварных соединений различного типа (разные FAT) и различными размахами напряжений (табл. 4).

В работах используются известные зависимости:

$$Q(n) = 1 - \exp[-nQ(1)]; \Sigma Q_B = 1 - \exp[-\Sigma Q(n)]. \quad (5)$$

Из табл. 4 видно, что вероятность  $\Sigma Q_B$  всегда выше вероятности  $Q(n)$ , которая в свою очередь выше  $Q(1)$ , т. е. обеспечение безопасности сварного узла только по одному из наиболее слабых соединений без учета характеристик других со-

единений является далеко не всегда обоснованным.

### Выводы

1. Сопrotивляемость усталостному разрушению сварного соединения является величиной достаточно стохастической. В этой связи рекомендации МИС [4], основанные на статистической обработке экспериментальных данных с гарантированной вероятностью отказа  $5 \cdot 10^{-2}$  в сочетании с рекомендациями по фактору безопасности  $\gamma_m = 1,0 \dots 1,4$ , являются достаточно обоснованными по схеме наиболее слабого звена для сварных конструкций при многоциклового усталости.

2. Сочетание экспериментальных данных отдельных организаций о вероятностных характеристиках сопротивляемости усталости с рекомендациями МИСа для многоциклового усталости сварных конструкций из ферритно-перлитных (ферритно-бейнитных) конструкционных сталей способствует расширению расчетных возможностей оценки безопасности за счет использования вероятностных подходов.



Таблица 4. Примеры расчета долговечности сварных узлов с 15 сварными соединениями для различных  $N$

FAT, МПа	A, МПа	B, МПа	n	Ds, МПа	Q(1)	Q(n)
$N = 2 \cdot 10^6$ цикл						
71	44	88	5	70	$7,59 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-2}$
63	42	73	5	60	$3,68 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$
45	36	36	2	50	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$4,52 \cdot 10^{-2}$
36	32	15	3	40	$7,77 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-1}$
$\Sigma Q_B$						$2,84 \cdot 10^{-1}$
$N = 1 \cdot 10^6$ цикл						
71	55	120	5	70	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
63	52	95	5	70	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$6,44 \cdot 10^{-3}$
45	46	49	2	60	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$
36	43	25	3	45	$4,09 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
$\Sigma Q_B$						$2,1 \cdot 10^{-2}$
$N = 6 \cdot 10^5$ цикл						
71	65	125	5	80	$2,07 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
63	62	108	5	80	$7,71 \cdot 10^{-4}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$
45	53	64	2	70	$4,96 \cdot 10^{-3}$	$9,93 \cdot 10^{-3}$
36	48	35	3	60	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$
$\Sigma Q_B$						$5,44 \cdot 10^{-2}$
$N = 1 \cdot 10^5$ цикл						
71	125	240	5	140	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$7,63 \cdot 10^{-5}$
63	120	200	5	140	$9,99 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$
45	100	90	2	110	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$3,05 \cdot 10^{-4}$
36	90	50	3	100	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$4,79 \cdot 10^{-3}$
$\Sigma Q_B$						$5,66 \cdot 10^{-3}$
$N = 1 \cdot 10^4$ цикл						
71	280	490	5	310	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$7,02 \cdot 10^{-5}$
63	240	400	5	270	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$
45	205	200	2	220	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$
36	195	105	3	210	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
$\Sigma Q_B$						$1,54 \cdot 10^{-3}$
Примечание. $n$ — количество однотипных соединений при заданном FAT; $Q(1)$ — вероятность отказа одного соединения; $Q(n)$ — вероятность отказа хотя бы одного из $n$ однотипных соединений; $\Sigma Q_B$ — вероятность отказа хотя бы одного из соединений сварного узла.						

1. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
2. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. — М.: Машиностроение, 1977. — 230 с.
3. Мэддокс С. Д. Усталостная прочность поперечных стыковых сварных швов, выполненных с одной стороны // www.svarka.info.ru.
4. Recommendation for fatigue design of welded joints and components. — S. I., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).
5. Design with EHS and AR plate // Svenskt stal, Heavy Plate Division. — Oxeloesund, 1987.

The paper deals with the issues of probabilistic determination of welded joint resistance to fatigue fracture at high-cycle fatigue. Analysis of the probability of reliable performance of joints for various types of applied loads at varying magnitudes has been performed.

Поступила в редакцию 09.02.2010



# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

**И. А. РЯБЦЕВ, И. А. КОНДРАТЬЕВ, В. Г. ВАСИЛЬЕВ**, кандидаты техн. наук,  
**В. А. ЖДАНОВ, А. А. БАБИНЕЦ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы структура и эксплуатационные свойства наплавленного металла, предназначенного для упрочнения и восстановления прокатных валков различного назначения. Наиболее высокую теплостойкость, горячую твердость и износостойкость при трении металла по металлу при высоких температурах имеет металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН132, однако у него самая низкая термостойкость. Наилучшую термостойкость имеет металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН130, хотя по ряду показателей он уступает другим материалам. Металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН147, по всем показателям занимает промежуточное положение.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, прокатные валки, порошковые проволоки, наплавленный металл, микроструктура, износостойкость, термостойкость, теплостойкость

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны порошковые проволоки ПП-АН130 (система легирования Fe–C–Cr–Mo–V), ПП-АН132 (Fe–C–Cr–W–Mo–V) и ПП-АН147 (Fe–C–Cr–Mo–Ni–V), используемые при дуговой наплавке инструментов и оснастки для горячей обработки металлов давлением, в частности, прокатных валков различного назначения [1]. В отдельных публикациях [2–4] приведены данные о структуре и некоторых свойствах металла, наплавленного этими проволоками. Однако зачастую эти испытания проводили по различным методикам и в разном объеме, поэтому не представлялось возможным достаточно объективно оценить достоинства того или иного типа наплавленного металла и дать обоснованные рекомендации по его применению. В данной статье изложены обобщенные результаты по изучению структуры металла, наплавленного этими проволоками, а также его эксплуатационных свойств, полученных при испытаниях в одинаковых условиях и по одним и тем же методикам.

Для изучения структуры и свойств наплавленного металла каждой из трех порошковых проволок в четыре-пять слоев были наплавлены заготовки, из которых вырезаны образцы для металлографических исследований, исследований теплостойкости, термостойкости, горячей твердости и износостойкости при трении металла по металлу при высоких температурах.

Известно, что структура и свойства наплавленного металла существенно зависят от скорости его охлаждения в области температур наименьшей устойчивости аустенита. Дуговая наплавка

прокатных валков, которые обычно изготавливают из углеродистых и высокоуглеродистых сталей, производится с предварительным подогревом до 300...350 °C и замедленным охлаждением в печи или термостате. Опытным путем установлено, что при наплавке без подогрева и охлаждении на спокойном воздухе скорость охлаждения наплавленных деталей составляет примерно 3,0...4,0 °C/с, а при наплавке с подогревом и замедленным охлаждением в печи или термостате — около 0,018...0,020 °C/с. Исходя из этого исследована структура наплавленного металла трех типов после нагрева до 950 °C и охлаждения — соответственно со скоростью 0,018 и 3,0 °C/с. Исследования проводили на dilatометре Шевенара, который обеспечивает охлаждение образцов с такими скоростями.

Установлено, что в металле, наплавленном порошковой проволокой ПП-АН130, при скоростях охлаждения 0,018 и 3,0 °C/с наблюдается сначала бейнитное, а затем мартенситное превращение. Отличие заключается в том, что при меньшей скорости охлаждения количество бейнита больше, а твердость наплавленного металла меньше. В итоге структура наплавленного металла этого типа при двух скоростях охлаждения состоит из мартенсита, бейнита, остаточного аустенита и карбидов (рис. 1, а, б). Твердость наплавленного металла HRC 44...47.

В металле, наплавленном порошковой проволокой ПП-АН132, при скорости охлаждения 0,018 °C/с вначале наблюдается бейнитное, после которого идет мартенситное превращение. При скорости охлаждения выше 3,0 °C/с вследствие более высокого содержания углерода и легирующих элементов (по сравнению с проволокой ПП-АН130) идет только мартенситное превращение.

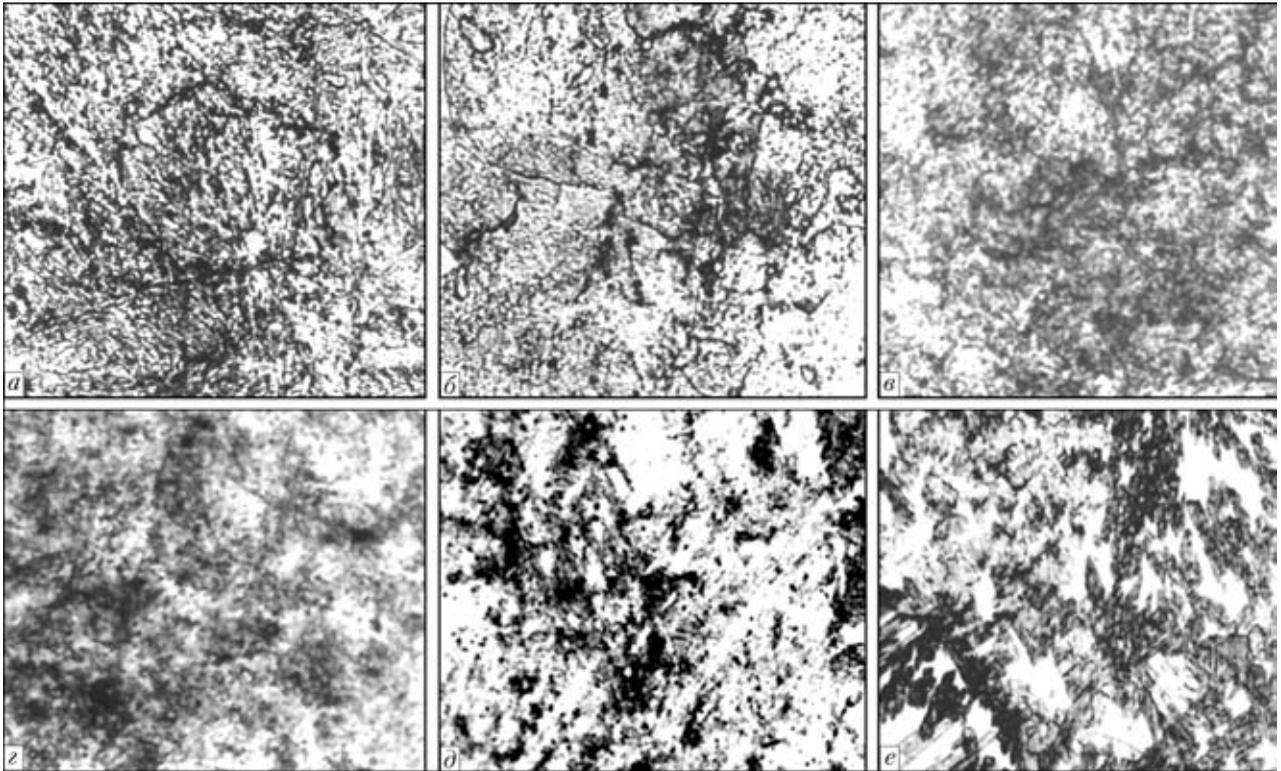


Рис. 1. Микроструктуры (X500) металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН130 (а, б), ПП-АН132 (в, г), ПП-АН147 (д, е): а, в, д — скорость охлаждения 3,0; б, г, е — 0,018 °C/c

Твердость наплавленного металла этого типа *HRC* 48...50, структура — мартенсит, остаточный аустенит, карбиды и небольшое количество бейнита (рис. 1, в, г).

В металле, наплавленном порошковой проволокой ПП-АН147, при данных скоростях охлаждения также наблюдается бейнитное и мартенситное превращения. Микроструктура наплавленного металла после охлаждения представляет собой мартенсит, бейнит и остаточный аустенит с карбидами (рис. 1, д, е). Твердость наплавленного металла *HRC* 46...49.

Исследованы свойства наплавленного металла трех типов.

**Теплостойкость.** Это способность стали сохранять при нагреве рабочей кромки в процессе эксплуатации структуру и свойства, необходимые для деформирования или резания. Теплостойкость штамповых сталей обычно характеризуется температурой двухчасового отпуска, после которого твердость составляет *HRC* 40 [5]. Для исследования теплостойкости изготовлено по девять образцов каждого типа наплавленного металла размерами 15×20×20 мм. Сначала образцы подвергали двухчасовому отпуску при температурах в интервале 200...700 °C. После остывания наплавленную поверхность образцов шлифовали и определяли твердость (рис. 2).

Установлено, что все типы наплавленного металла характеризуются достаточно высокой теплостойкостью — 630...650 °C. Однако наилуч-

шую теплостойкость имеет металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН132. Характер кривой у него такой же, как и у металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН130. Отличие заключается лишь в том, что снижение твердости у этого типа наплавленного металла начинается при более высоких температурах отпуска.

У всех трех типов наплавленного металла отмечается небольшое увеличение твердости в результате отпуска в температурном интервале 500...550 °C. Эффект вторичного твердения наблюдается вследствие распада остаточного аустенита с образованием мартенсита и карбидов, что и ведет к увеличению твердости.

**Износостойкость при трении металла по металлу при повышенных температурах.** Известно, что в процессе горячей обработки металлов и сплавов (прокатка, ковка, штамповка) удельное давление металла на инструмент может быть весьма значительным и по некоторым данным достигает 300...500 МПа. В очаге деформации всегда имеет место скольжение металла в результате его вытяжки, что наряду с высокими удельными давлениями приводит к износу рабочей поверхности инструмента при трении металла по металлу при повышенных температурах. Поэтому определение износостойкости наплавленного металла в этих условиях имеет важное значение.

К основным параметрам испытаний относят величину удельного давления на испытываемый об-

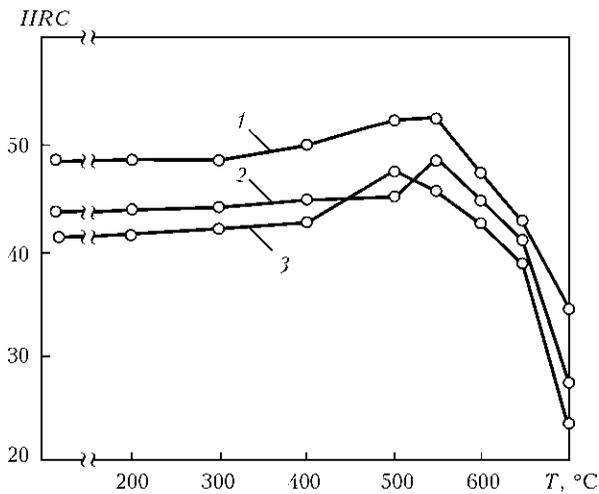


Рис. 2. Зависимость твердости металла, наплавленного различными порошковыми проволоками, от температуры отпуска: 1 — ПП-АН132; 2 — ПП-АН147; 3 — ПП-АН130

разец, температуру нагрева и охлаждения образца, скорость относительного перемещения трущихся элементов (скорость трения), вид материала истирающего кольца. Лабораторные испытания на износ при трении металла по металлу при повышенных температурах по схеме кольцо – плоскость проводили на универсальной испытательной установке [6]. Для этого из наплавленных заготовок изготавливали образцы размерами 40×10×17 мм, толщина наплавленного слоя при этом составляла 8...10 мм. Во время испытаний образец наплавленной плоскостью прижимали к вращающемуся кольцу-контртелу, которое нагревали газовой горелкой. Кроме того, образец совершает возвратно-поступательные перемещения в вертикальной плоскости, скользя по поверхности вращающегося кольца-контртела. Условия испытаний следующие: нагрузка 800 Н (удельное давление около 100 МПа); скорость вращения

кольца-контртела 30 об/мин; амплитуда колебаний образца в вертикальной плоскости 20 мм, частота колебаний 62 мин<sup>-1</sup>; температура образца в зоне истирания 600 °С; время испытаний 1 ч. В качестве контртела использовали кольца диаметром 120 мм из стали 45.

Скорость трения в экспериментах составляла 20...22 м/мин, что отвечает наиболее применяемым в промышленности режимам при горячей деформации металлов. Истирающее кольцо нагревали газокислородным пламенем. Благодаря строго определенному расходу горючего газа и кислорода температуру истирающего кольца поддерживали постоянной — 950...980 °С, а температуру кольца периодически контролировали с помощью оптического пирометра.

Результаты испытаний на износ при трении металла по металлу при повышенных температурах приведены на рис. 3, а. Наименьший износ имел металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН132, наибольший — порошковой проволокой ПП-АН130. Лучшую износостойкость наплавленного металла первого типа, по-видимому можно объяснить более высоким содержанием углерода и легирующих элементов и его более высокой теплостойкостью и твердостью.

**Термостойкость.** Это важнейшее свойство, которое характеризует устойчивость наплавленного металла против образования трещин разгара при многократном повторении циклов нагрев-охлаждение. Как правило, долговечность инструментов для горячей деформирования металлов в первую очередь зависит от этого свойства [1, 7, 8].

Методика испытаний на термостойкость должна предусматривать оптимальные размеры и форму наплавленного образца; температуру и скорости его нагрева и охлаждения, близкие к этим

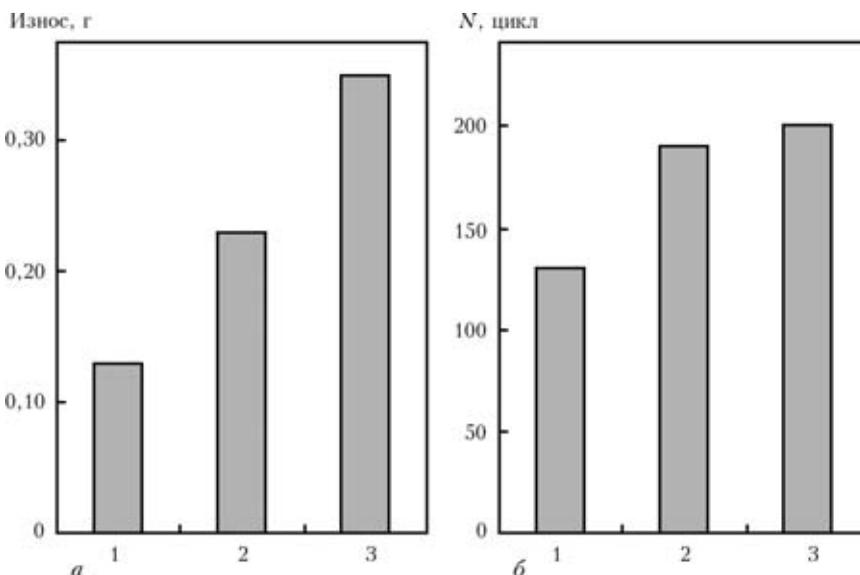


Рис. 3. Износ при трении металла по металлу при повышенных температурах (а) и термостойкость (б) металла, наплавленного различными порошковыми проволоками: 1 — ПП-АН132; 2 — ПП-АН147; 3 — ПП-АН130

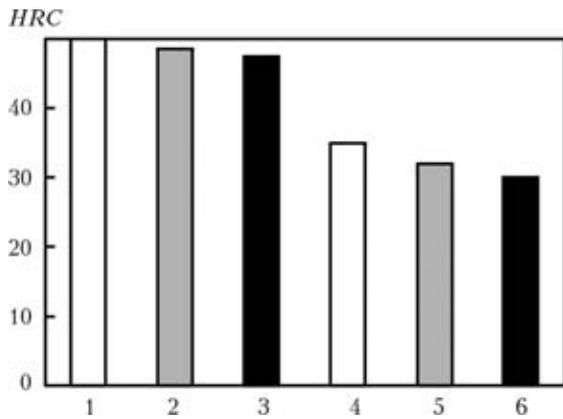


Рис. 4. Твердость металла, наплавленного различными порошковыми проволоками, при температурах 20 (1–3) и 600 °С (4–6): 1, 4 — ПП-АН132; 2, 5 — ПП-АН147; 3, 6 — ПП-АН130

показателям для наплавливаемых деталей и т. д. Для оценки термостойкости материалов, используемых для наплавки инструментов для горячего деформирования металлов, образец должен иметь достаточную массу, чтобы в процессе его поверхностного нагрева был обеспечен градиент температур и напряжений, имитирующий натурные условия.

Испытания на термостойкость наплавленного металла проводили на установке для комплексной оценки свойств наплавленного металла [6]. Для этого из наплавленных заготовок вырезали образцы размером 30×40×40 мм, наплавленную поверхность образцов шлифовали. Образец устанавливали в державку испытательной установки шлифованной поверхностью вверх, которую нагревали газопламенным резаком. Равномерный нагрев получали на пятне нагрева диаметром 15...20 мм. Нагрев продолжали 11 с, охлаждение мощной струей воды — 8 с. После стабилизации условий испытания максимальная температура образца в пятне нагрева составляла 650...700, при охлаждении — 60...80 °С. Термостойкость оценивали по количеству циклов нагрев-охлаждение поверхности наплавленного образца до появления сетки разгара, видимой невооруженным взглядом (рис. 3, б).

Лучшую термостойкость имел металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН130, несколько уступал ему металл, наплавленный проволокой ПП-АН147. Хуже была термостойкость у металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН132.

Как известно [5], на термическую усталость отрицательно влияет структурная неоднородность сталей: присутствие карбидных (интерметаллидных) избыточных фаз, необходимых для повышения тепло- и износостойкости. Термостойкость начинает заметно снижаться, если их количество превышает 10...12 %. По-видимому, этим можно объяснить пониженную термостойкость металла,

наплавленного порошковой проволокой ПП-АН132.

**Горячая твердость.** В условиях эксплуатации инструмента для горячего деформирования металла большое значение имеет твердость металла при повышенных температурах (горячая твердость). Сопротивляемость износу материала зависит от его противостояния пластической деформации, т. е. твердости при повышенных температурах и способности материала длительно сохранять твердость. Как правило, высоким сопротивлением износу при повышенных температурах характеризуются стали, содержащие молибден, вольфрам, хром, ванадий, при этом исходная твердость при комнатной температуре не имеет большого значения.

Исследована горячая твердость наплавленного металла выбранных типов. Нагрев образцов проводили в специальном индукторе в вакууме, замеры твердости — при нагрузке 1 кг, выдержка под нагрузкой 60 с. Как указывалось в работе [7], температура прокатных валков в очаге деформации составляет 600...650 °С, поэтому горячую твердость наплавленного металла определяли при этой температуре и для сравнения при 20 °С (рис. 4).

Наплавленный металл всех трех типов имеет примерно одинаковую твердость при комнатной температуре. Твердость при высокой температуре различается в большей степени: металл, наплавленный проволокой ПП-АН132, имеет твердость на уровне *HRC* 35; проволокой ПП-АН147 — *HRC* 32; проволокой ПП-АН130 — *HRC* 30.

Таким образом, наилучшую теплостойкость, горячую твердость и износостойкость при трении металла по металлу при высоких температурах имеет металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН132, однако у него самая низкая термостойкость. Наилучшую термостойкость имеет металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН130, хотя по другим эксплуатационным свойствам он уступает двум другим типам наплавленного металла. Металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН147, по всем эксплуатационным показателям занимает промежуточное положение.

## Выводы

1. Исследования микроструктуры металла, наплавленного порошковыми проволоками ПП-АН130, ПП-АН132 и ПП-АН147, показали, что при имитации термического цикла дуговой наплавки прокатных валков (предварительный подогрев и замедленное охлаждение после наплавки) структура всех трех типов наплавленного металла состоит из мартенсита, бейнита, остаточного аустенита и карбидов в различном соотношении. У всех трех типов наплавленного металла отмечается небольшое увеличение твердости в результате отпуска в



температурном интервале 500...550 °С. Вторичное твердение происходит вследствие распада остаточного аустенита с образованием мартенсита и карбидов, что и ведет к увеличению твердости.

2. Исходя из свойств наплавленного металла, порошковую проволоку ПП-АН130 можно рекомендовать для наплавки валков блюмингов и слябингов и черновых клетей листовых и штрипсовых станов, в которых происходит деформация металла, нагретого до наиболее высоких температур. Порошковую проволоку ПП-АН132 целесообразно использовать для наплавки прокатных валков предчистовых и чистовых клетей, в которых деформация металла идет при относительно невысоких температурах и нет необходимости в высокой термостойкости наплавленного металла, а более существенную роль играют его износостойкость и горячая твердость. Порошковую проволоку ПП-АН147, которая имеет наиболее благоприятное сочетание всех эксплуатационных свойств, можно рекомендовать для нап-

лавки тяжело нагруженных валков черновых клетей трубо- и сортопрокатных станов.

1. *Рябцев И. А., Кондратьев И. А.* Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — Киев: Екотехнология, 1999. — 62 с.
2. *Кондратьев И. А., Лазаренко Ю. Н.* Опыт применения порошковой проволоки большого диаметра для механизированной наплавки // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1978. — С. 12–14.
3. *Повышение срока службы и стойкости прокатных валков методами наплавки / И. И. Фрумин, Г. В. Ксендзык, И. А. Кондратьев, П. В. Гладкий // Черн. металлургия. — 1986. — Вып. 7. — С. 11–19.*
4. *Рябцев И. А., Кусков Ю. М., Кондратьев И. А.* Дуговая и электрошлаковая наплавка валков прокатных станов // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 7–10.
5. *Геллер Ю. А.* Инструментальные стали. — М.: Металлургия, 1983. — 527 с.
6. *Рябцев И. И., Черняк Я. П., Осин В. В.* Блочно-модульная установка для испытаний наплавленного металла // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 18–20.
7. *Фрумин И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
8. *Тылкин М. А.* Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. — М.: Металлургия, 1971. — 608 с.

Structure and service properties of the deposited metal designed for strengthening and reconditioning of various-purpose rolling rolls have been studied. Metal deposited with PP-AN132 flux-cored wire has the highest heat resistance, hot hardness and wear resistance at metal-on-metal friction at high temperatures; however, it has the lowest thermal stability. Metal deposited with PP-AN130 flux-cored wire has the highest thermal stability, although it is inferior to other materials as to other indices. Metal deposited with PP-AN147 flux-cored wire takes an intermediate position by all the indices.

Поступила в редакцию 18.01.2010

## НАНОТВЕРДОСТЬ И СОВРЕМЕННЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Международная научно-техническая  
и научно-методическая конференции

10–11 октября 2010

г. Харьков ХНАДУ (ХАДИ)

### Тематика конференции:

- ✓ актуальные проблемы определения нанотвердости материалов
- ✓ современные технологии получения и методы исследования наноструктурных слоев и покрытий
- ✓ использование нанотехнологий для повышения конструктивной прочности деталей машин
- ✓ нанотехнологии в содержании инженерных и специальных дисциплин, методические особенности их преподавания
- ✓ конструкционные функциональные наноматериалы (методы исследования и результаты)

По вопросам участия в конференции,  
опубликования докладов обращаться по тел. (057) 700-38-75; (057) 707-37-29;  
E-mail: mvi@knadi.kharkov.ua



УДК 621.791.3.042

## ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК ОЛОВА НА СТРУКТУРУ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИПОЕВ СИСТЕМЫ Ag–Cu–Zn

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ**, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук, **Б. В. СТЕФАНИВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние присадок олова и силикокальция на структуру, интервалы плавления и растекаемость сплава системы Ag–Cu–Zn. Установлено, что бескадмиевые припои этой системы имеют хорошие технологические свойства и обеспечивают прочностные характеристики соединений, близкие к таковым у припоя ПСр-40.

*Ключевые слова:* пайка, припой, бескадмиевый припой, эвтектика, термический анализ, структура, технологические свойства

Припои на основе серебра нашли практическое применение несколько тысячелетий назад. В настоящее время на современном рынке паяльных материалов они завоевали прочные позиции. Серебро в чистом виде может применяться в качестве припоя, но для большинства припоев основой служит эвтектика системы Ag–Cu [1] с температурой плавления 779 °С, содержащая примерно 28 мас. % Cu. Добавка к сплавам системы Ag–Cu цинка ведет к образованию тройной эвтектики 56Ag–24Zn–20Cu (точка E на рис. 1) с температурой плавления, равной 665 °С [2].

Для снижения температуры плавления сплавы этой системы легируют четвертым (пятым, шестым) элементом. Широкое распространение получили припои системы Ag–Zn–Cu–Cd, которых существует огромное количество. Они в различных вариантах представлены как в каталогах всех фирм, производящих припои, так и в стандартах развитых стран [3]. Главным преимуществом припоев этой системы является то, что они имеют наименьшую температуру пайки из широкой гаммы припоев на основе серебра. Так, температура эвтектики этой четверной системы (45Ag–15Cu–16Zn–24Cd) составляет примерно 615 °С [4], в то время, как у наиболее применяемого припоя ПСр-40 температура солидуса равна 590, а ликвидуса — 610 °С. Эти припои успешно используют при пайке различных материалов, причем для широко применяемых сплавов на основе железа и меди они обеспечивают получение соединений с хорошими механическими свойствами.

Между тем вопрос о замене кадмия в припоях возник давно. Европейским парламентом и консулом Объединенной Европы принята директива о запрещении использования опасных веществ,

к которым отнесен, в частности, и кадмий. В качестве альтернативы ему выбрано олово [5, 6].

В работе [5] приведены данные о том, что в сплавах системы Ag–Cu–Zn, Ag–Cu–Zn–Cd и Ag–Cu–Zn–Sn (рис. 2) за счет присадки олова можно значительно понизить температуру солидуса и ликвидуса по сравнению с тройной системой, однако температурный интервал плавления при этом будет более высокий. Для достижения температуры солидуса сплавов примерно 630 °С необходимо, чтобы содержание серебра в сплаве Ag–Cu–Zn–Sn составляло около 55 мас. %, т. е. было несколько выше, чем в широко применяемых припоях. Это, по мнению автора работы [5], может привести к увеличению стоимости работ на 15...20 %. Позже аналогичная задача была поставлена в работе [6], причем в ней широко использовались данные [5], в частности, сведения о сплавах № 1 и 4 (табл. 1). Следует отметить, что спектр припоев, рассматриваемых в работе [7], значительно расширен. Там же приведены данные о прочностных свойствах припоев в состоянии после отливки, при этом сравнивали сплавы систем Ag–Cu–Zn, Ag–Cu–Zn–Sn, Ag–Cu–Zn–Cd.

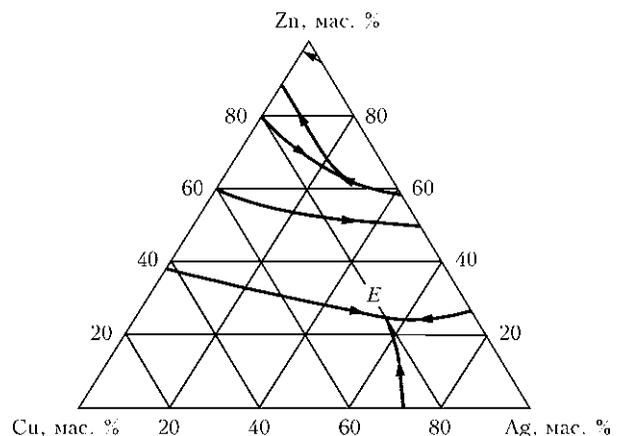


Рис. 1. Проекция поверхности кристаллизации диаграммы состояния системы Cu–Ag–Zn [2]

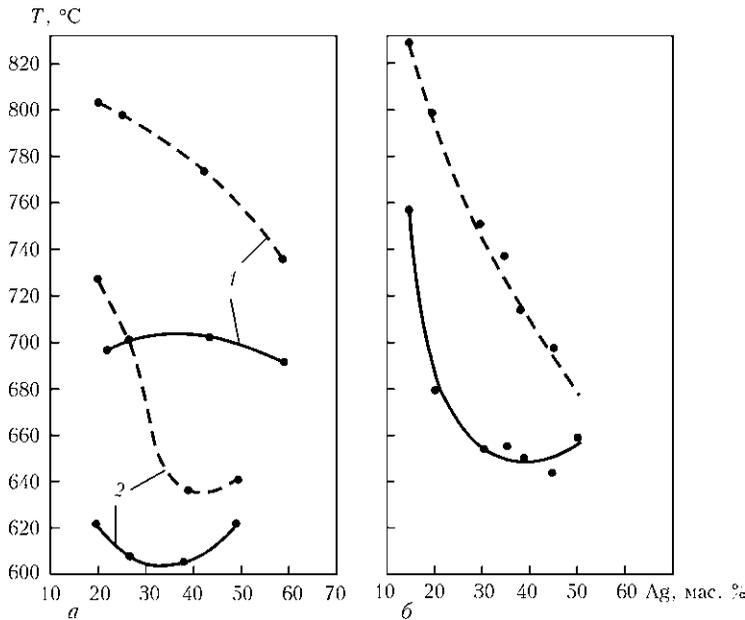


Рис. 2. Изменение температуры солидуса (сплошная кривая) и ликвидуса (штриховая) в сплавах систем Ag–Cu–Zn (1), Ag–Cu–Zn–Cd (2) (а) и Ag–Cu–Zn–Sn (б) в зависимости от содержания в них серебра

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что припои системы Ag–Cu–Zn–Sn не уступают как припою тройной системы, так и с кадмием, что очень важно с точки зрения их практического применения. При этом следует отметить следующий интересный факт. Припои № 3–5 (табл. 1) имеют близкий химический состав, который соответствует стандартному американскому припою ВAg-28. В то же время они заметно отличаются своими механическими свойствами, причем припой № 5 имеет самую низкую, а припой № 4 самую высокую прочность из всех исследованных сплавов. Объяснение этому в работе [6] не дано. Не приведены там также прочностные характеристики паяных соединений.

Судя по номенклатуре рынка рассматриваемые припои еще не потеснили кадмийсодержащие. Необходимо получить более широкие сведения о сплавах системы Ag–Cu–Zn–Sn, чтобы выявить

причину низкой популярности этих припоев на мировом рынке.

Целью настоящей работы было исследование влияния присадок олова (3...10 мас. %) в сплавы системы Ag–Cu–Zn на структуру последних, площадь растекания и прочность полученных паяных соединений стали 12Х18Н10Т, а также на те же параметры при добавлении силикокальция.

В ИЭС им. Е. О. Патона проводили исследования влияния олова на интервал плавления, структуру и прочность соединения. Шихту изготовляли из чистых материалов (серебра марки СрА-1, меди катодной М0к, цинка марки ЦВ). С учетом высокого давления насыщенного пара цинка его массовая доля в шихте была на 2 % выше, чем в припое. Припои выплавляли при высокочастотном нагреве в графитовом тигле, в качестве защиты использовали флюс ПВ200. Сначала расплавляли медь и серебро, затем нагрев прекращали, а после снижения температуры металла до 400...500 °С вводили цинк и кадмий. С целью обеспечения однородности расплава за счет индукционного и механического перемешивания несколько раз повторяли кратковременный нагрев припоя до его расплавления.

В качестве основного металла выбрана сталь 12Х18Н10Т толщиной 2 мм. Заготовки размером 100×20×2 мм паяли с применением газопламенного нагрева и флюса ПВ209. Нахлестка составляла 2 мм. Флюс предварительно наносили на место пайки в виде пасты, замешанной на воде, которую высушивали до начала нагрева. После нагрева до температуры расплавления флюса в место соединения помещали навеску припоя, а нагрев продолжали до расплавления последнего и формирования соединения. Образцы после пай-

Таблица 1. Химический состав, интервалы плавления и прочность припоев [6]

Номер припоя	Химический состав элементов, мас. %					Температурный интервал плавления, °С	Прочность на разрыв в литом состоянии, МПа
	Ag	Cu	Zn	Sn	Cd		
1	30	36	32	2	—	665...755	448
2	35	34	30	1	—	660...740	476
3 (ВAg-28)	39	31	28	2	—	645...725	473
4 (ВAg-28)	39	31	27	3	—	635...710	497
5 (ВAg-28)	40	30	28	2	—	649...710*	406
6 (ВAg-1а)	50	15	16	—	19	627...635*	457
7	40	30	28	—	—	—	441
8	45	25	30	—	—	—	425

\* Данные взяты из работы [3].



**Таблица 2. Результаты испытаний припоев системы Ag–Cu–Zn–Sn на растекание и прочность паяных соединений стали 12X18Н10Т на срез**

Номер партии припоя	Системы припоя	Площадь растекания, мм <sup>2</sup>	Прочность на срез, МПа
1	56Ag–22Cu–17Zn–5Sn	130,3	$\frac{242,7 \dots 297,9}{267,4}$
2	57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn	125,9	$\frac{267,3 \dots 288,5}{275,4}$
3	55Ag–21,5Cu–16,5Zn–7Sn	140,9	$\frac{251,4 \dots 263,9}{259,5}$
4	55Ag–20Cu–15Zn–10Sn	127,9	$\frac{158,1 \dots 214,1}{187,8}$
5	56Ag–22Cu–17Zn–5Sn–0,25SiCa	117,5	$\frac{250,3 \dots 277,2}{263,1}$
6	57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn–0,25SiCa	119,2	$\frac{284,9 \dots 298,8}{290,5}$
7	55Ag–21,5Cu–16,5Zn–7Sn–0,25SiCa	139,2	$\frac{234,5 \dots 261,2}{251,1}$
8	55Ag–21,5Cu–15Zn–10Sn–0,25SiCa	152,1	$\frac{168,4 \dots 203,0}{183,1}$

ки обрабатывали для устранения усиления, а затем испытывали на разрыв на машине MTS-20.

Эксперименты по растеканию припоев проводили согласно ГОСТ 23904–79. На пластину размером 40×40 мм укладывали навеску припоев массой (0,50±0,01) г. Флюс насыпали сверху на припой, установленный на подложке. Образцы нагревали в течение 3 мин в печи, предварительно нагретой до 700 °С. Площадь растекания каждого припоя вычисляли с помощью программы Auto-Card 2002. Состав исследованных припоев, результаты экспериментов на растекание и прочность паяных соединений приведены в табл. 2.

Анализ полученных данных показал, что площадь растекания припоев с различным содержанием олова находится примерно в одних пределах, т. е. содержание олова влияет на эту характеристику незначительно, в том числе и в сплавах с силикокальцием. Некоторое увеличение площади растекания можно отметить только при содержании олова 7 мас. %. Из табл. 2 следует, что прочность соединений уменьшается с увеличением содержания олова в припое. Если прочность соединений, паянных припоем с 3 мас. % Sn, составляет 275 МПа, то с 10 мас. % Sn — 187 МПа. Кроме того, с повышением содержания олова стабильность результатов ухудшается.

Для припоев с силикокальцием сохраняется такая же тенденция: прочность соединений, паянных припоем с 3 мас. % Sn, составляет 290 МПа, а с 10 мас. % Sn — 183 МПа. Пропорционально снижается стабильность результатов испытаний. В то же время приведенные данные показывают некоторое повышение прочности соединений при присадке силикокальция в сплав с 3 мас. % Sn.

В этом случае легирование силикокальцием следует признать полезным. При значительном содержании олова влияние силикокальция нивелируется, а значит его введение нецелесообразно.

Новые данные получены при исследовании интервалов плавления и структур исследованных сплавов с различным содержанием олова. Интервалы плавления сплавов определяли на установке ВДТА-8 в атмосфере гелия. Масса исследуемого образца составляла 1,03 г, скорость его нагрева и охлаждения — 80 °С/мин. Для достижения хорошего прилегания навески ко дну тигля и обеспечения надежных сведений о тепловых эффектах образцы нагревали 2 раза. Термические эффекты фиксировали по кривой второго нагрева, причем солидус и ликвидус сплава определяли также по этой кривой (при охлаждении сплава существенное влияние оказывает переохлаждение перед началом кристаллизации). В то же время уровень тепловых эффектов лучше отражен на кривых охлаждения сплавов.

Анализ полученных данных показал, что легирование оловом существенно влияет на температуру фазовых превращений и интервал плавления. Так, в сплавах с 3 мас. % Sn состав практически однофазный (рис. 3, б). Температура солидуса составляет 640, а ликвидуса — 690 °С. При температуре 680 °С имеет место едва заметный тепловой эффект, который существенно не проявляется даже при охлаждении, т. е. содержание второй фазы незначительное. Появление теплового эффекта заметно при температуре 480...490 °С, что вряд ли можно связать с плавлением легкоплавкой составляющей. Скорее всего, это следствие фазового превращения в твердой фазе, что



Таблица 3. Химический состав (мас. %) сплавов, полученный путем термического анализа

Исследуемый участок	Ag	Cu	Zn	Sn	Si
57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn (эвтектика)					
Темная фаза	32,072	47,222	19,359	1,344	0
Светлая фаза	75,732	6,880	13,305	3,833	0,252
Эвтектика	74,127	12,133	12,948	0,711	0,085
57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn–0,25SiCa (эвтектика)					
Темная фаза	18,212	58,161	21,811	1,285	0,528
Светлая фаза	75,835	7,609	13,046	3,333	0,189
Эвтектика	73,486	7,144	13,534	5,716	0,120
56Ag–22Cu–17Zn5–Sn					
Темная фаза	15,638	59,222	22,458	2,517	0,160
Светлая фаза	74,588	9,837	11,880	3,696	0
Эвтектика	69,885/68,269	6,400/6,867	9,698/10,379	13,917/14,257	0,091/0,219
56Ag–22Cu–17Zn–5Sn–0,25SiCa					
Темная фаза	17,153	55,552	24,570	2,486	0,236
Светлая фаза	72,037	8,520	12,320	6,838	0,285
Эвтектика	58,129	18,081	14,749	7,846	0,393
55Ag–21,5Cu–16,5Zn–7Sn–0,25SiCa					
Темная фаза	17,706	60,295	20,517	1,182	0,298
Светлая фаза	77,668	3,793	10,968	7,274	0,305
Эвтектика	74,851	4,467	11,466	8,798	0,423
55Ag–21,5Cu–16,5Zn–10Sn–0,25SiCa					
Темная фаза	9,551	64,382	22,305	3,357	0,402
Светлая фаза	76,841	5,075	7,932	10,027	0,963
Эвтектика	72,816	6,234	8,343	12,312	0,290

косвенно подтверждается наличием ряда превращений в твердой фазе в системе Sn–Cu [7].

Для сплава с 5 мас. % Sn получены примерно такие же результаты, как для сплава с 3 мас. % Sn (рис. 3, а), т. е. он является практически однофазным при плавлении и кристаллизации, термический эффект имеет место при температуре

490 °С. Трудно объяснить незначительное повышение температуры ликвидуса, тем более, что на кривой охлаждения термический эффект расположен ниже, чем у сплава с 3 мас. % Sn. Прочность соединений при этом несколько снижается.

В сплаве с 7 мас. % Sn четко фиксируется наличие двух термических эффектов, возникающих

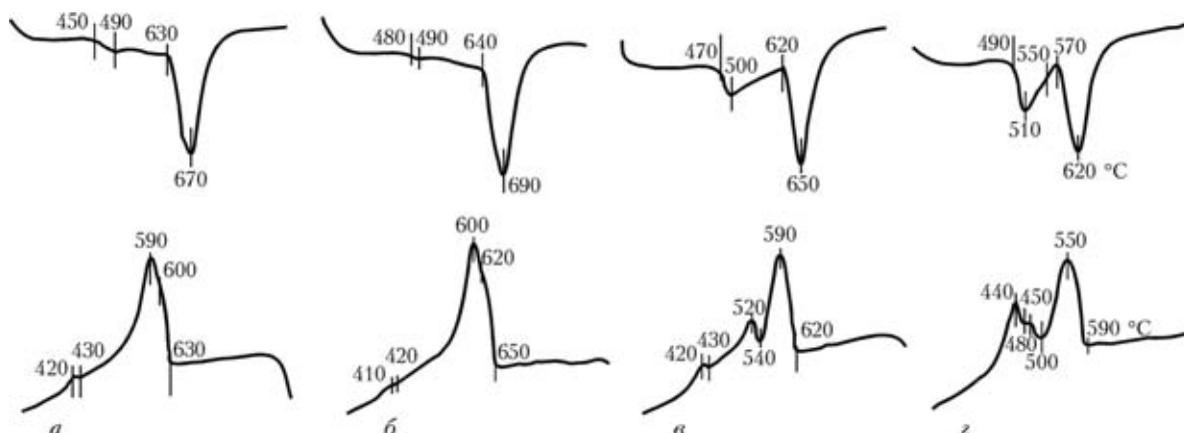


Рис. 3. Данные дифференциального термического анализа сплавов систем 56Ag–22Cu–17Zn–5Sn (а), 57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn (б), 55Ag–21,5Cu–16,5Zn–7Sn (в), 55Ag–20Cu–17Zn–10Sn (г)



при температуре 620...650 и 470...500 °С. На кривой охлаждения видно наличие третьего эффекта при температуре 420...430 °С (рис. 3, в). При этом прочность соединений, паянных этим припоем, заметно снижается.

В сплаве с 10 мас. % Sn выявлено наличие тепловых эффектов, но в более явном виде (рис. 3, з). Прочность соединений значительно снижается (примерно на 90 МПа по сравнению с соединениями, паянными припоем с 3 мас. % Sn). В сплавах с присадкой силикокальция при повышении содержания олова имеют место примерно те же закономерности, что и в сплавах без присадки этого элемента (рис. 4).

Исследование структуры и химической неоднородности сплавов с 3 мас. % Sn показало, что их можно отнести к эвтектическим структурам с большим или меньшим содержанием первичной фазы. Присадка силикокальция общий характер структуры не меняет (рис. 5, а, б). В сложной структуре трудно точно определить состав эвтектики, но можно судить о составе отдельных фаз. Темная фаза (на основе меди) содержит примерно 32 мас. % Ag, 19 мас. % Zn, 1,3 мас. % Sn (табл. 3), а светлая фаза (на основе серебра) примерно 6,8 мас. % Cu, 13,3 мас. % Zn, 3,8 мас. % Sn. Пер-

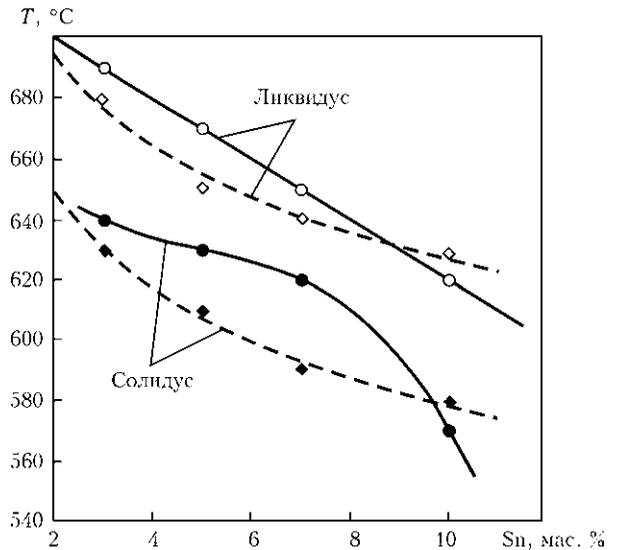


Рис. 4. Изменения температуры ликвидуса и солидуса в сплавах системы Ag–Cu–Zn–Sn (сплошная кривая) и с добавлением силикокальция Ag–Cu–Zn–Sn (SiCa) (штриховая)

вый состав находится в более высокотемпературной области, чем второй. Таким образом, первый сплав должен быть несколько более высокотемпературным и кристаллизоваться первым, это видно на рис. 5, а, б. Сплавы, содержащие олово, кристаллизуются в практически не различимых

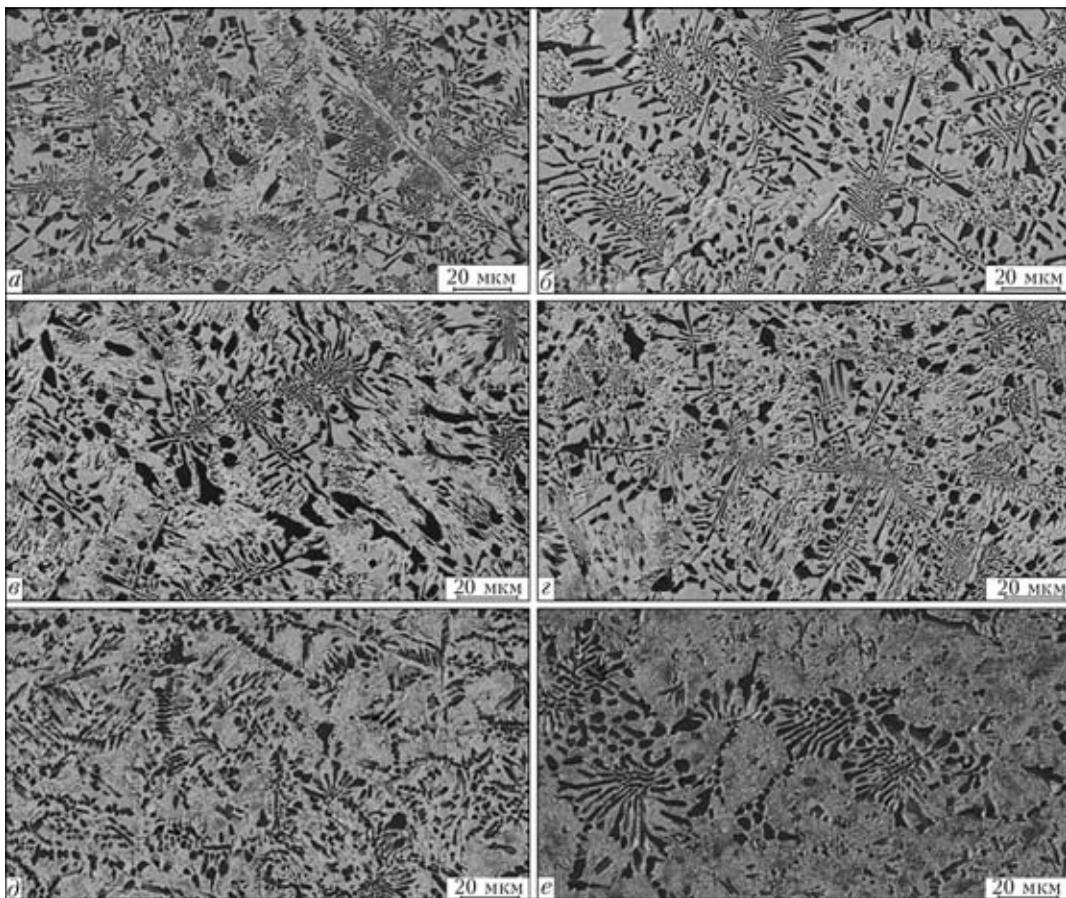


Рис. 5. Микроструктуры сплавов систем 57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn (а), 57,5Ag–22,5Cu–17Zn–3Sn–0,25SiCa (б), 56Ag–22Cu–17Zn–5Sn (в), 56Ag–22Cu–17Zn–5Sn–0,25SiCa (г), 55Ag–21,5Cu–16,5Zn–7Sn–0,25SiCa (д) и 55Ag–20Cu–15Zn–10Sn–0,25SiCa (е)



температурных интервалах (см. рис. 3, в). Можно предположить, что кристаллизация сплавов протекает следующим образом. Из жидкости выделяются первичные дендриты фазы на основе меди, вокруг которой в близком температурном интервале начинается кристаллизоваться вторая фаза, т. е. идет кристаллизация конгломератной эвтектики, а в промежутках начинается кристаллизация нормальной (пластинчатой) эвтектики. Поскольку первичных кристаллов немного, нормальная эвтектика занимает большую часть шлифа. Следует отметить, что в некоторых случаях эвтектика имеет как бы дендритный ствол, а эвтектическая колония выглядит как «эвтектический дендрит». Подобная эвтектическая кристаллизация отмечена в припое системы Ni–Mn–Cu–Si [8].

Введение силикокальция не оказывает заметного влияния на структуру припоя, а также на распределение элементов по структурным составляющим.

Как отмечалось выше, кривые, полученные с помощью высокотемпературного дифференциального анализа для сплавов с 3 и 5 мас. % Sn, очень похожи. То же можно сказать и о структуре этих сплавов (см. рис. 5, а–г). Следует отметить, что содержание олова в структурных составляющих сплавов с 5 мас. % Sn увеличивается, особенно при присадке силикокальция.

При увеличении массовой доли олова до 7 % содержание темной высокотемпературной фазы на основе меди также возрастает, структура в целом (а особенно эвтектическая составляющая) сильно измельчается, как и при 10 мас. % Sn (рис. 5, д). В то же время в сплавах с 10 мас. % Sn и присадкой силикокальция встречаются участки более крупнозернистой эвтектики (рис. 5, е). Вероятно, это зависит от условий охлаждения слитков.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что присадки олова в сплавы системы Ag–Cu–Zn влияют менее эффективно, чем кадмия. Так, минимальная достигнутая температура ликвидуса составляет примерно 650 °C даже в сплавах с 7 мас. % Sn, т. е. существенно выше, чем в сплавах с высоким содержанием кадмия.

The effect of tin and silicocalcium fillers on structure, melting temperature ranges and spreadability of alloy of the Ag–Cu–Zn system was investigated. It was found that cadmium-free brazing filler metals of the Ag–Cu–Zn system are characterised by good performance and provide strength properties of the joints close to those of brazing filler metal PSr-40.

Однако при содержании олова 7 и более 10 мас. % интервал плавления двухфазный и очень широкий, что ухудшает технологические свойства припоя. Кроме того, существенно ухудшаются прочностные характеристики соединений (см. табл. 3). Исходя из полученных результатов можно констатировать, что более приемлемыми для использования являются сплавы с 3 или максимум 5 мас. % Sn. При этом присадку силикокальция следует считать полезной.

## Выводы

1. Исследованные составы экологически чистых припоев системы Ag–Cu–Zn–Sn имеют структуру, близкую к эвтектической, приемлемый интервал плавления и обеспечивают соединениям хорошие технологические свойства.

2. Применение этих припоев вместо припоев системы Ag–Cu–Zn–Cd при пайке нержавеющей сталей способствует получению сопоставимых показателей прочности при содержании олова в припоях не более 5 мас. %.

3. Припои рассматриваемой системы не требуют изменения способов нагрева, состава флюсов, использования каких-либо специальных приемов и легко могут применяться в производственных условиях.

1. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справ. В 3 т. Т.1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1996. — 992 с.*
2. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей и др. — М.: Наука, 1979. — 248 с.*
3. *Schwartz M. M. Brazing. — Ohio: Metals Park, 1987. — 455 p.*
4. *Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. — М.: Машиностроение, 2003. — 480 с.*
5. *Roberts P. M. Recent developments in cadmium-free silver brazing alloys // Welding J. — 1978. — № 10. — P. 23–30.*
6. *Timmings P. F. The development of Ag-based brazing alloys // Ibid. — 1994. — № 10. — P. 31–33.*
7. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справ. В 3 т. Т. 2 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1996. — 1023 с.*
8. *Хорунов В. Ф. Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 2008. — 240 с.*

Поступила в редакцию 03.03.2010



УДК 621.791.762.1

# СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЕССОВОЙ СВАРКОПАЙКОЙ С ФОРМИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

**А. С. ПИСЬМЕННЫЙ**, д-р техн. наук, **А. С. ПРОКОФЬЕВ**, **А. А. ПИСЬМЕННЫЙ**,  
**Д. П. НОВИКОВА**, кандидаты техн. наук, **Р. В. ЮХИМЕНКО**, **В. В. ПОЛУХИН**,  
**И. И. ПТАШИНСКАЯ**, **Ю. В. ПОЛУХИН**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Обобщены результаты оценки влияния формирующего устройства на свойства кольцевого стыкового шва, образующегося при сварке трубных заготовок прессовой стыковой сваркопайкой в твердой фазе. Исследовано распределение химических элементов и фазовый состав в металле сварного шва и прилегающей зоне.

*Ключевые слова:* сварка, прессовая стыковая сварка давлением, сваркопайка, осадка, деформирование, формирование, сварной шов, химический состав, распределение элементов

В процессе прессовой сварки давлением в твердой фазе с применением высокочастотного нагрева формирование металла шва по всей длине соединения происходит неравномерно, что выражено в различной толщине шва. Причина неоднородности главным образом обусловлена сложным характером перемещения нагретых кромок в процессе их пластической деформации при осадке, в частности, неоднородностью нагрева кромок заготовки по сечению.

Образующиеся при этом периферийные галтельные участки шва имеют большую ширину закристаллизовавшейся прослойки шва в сравнении с внутренними участками шва, где вместо металла шва наблюдаются лишь общие проросшие зерна основного металла.

Встречающиеся отдельные видимые фрагменты закристаллизовавшейся прослойки шва имеют размеры, соизмеримые с размерами зерна основного металла, а также наблюдается тенденция к увеличению толщины шва при приближении к галтельному участку [1–5].

В ИЭС им. Е. О. Патона для достижения однородного по толщине сварного шва при формировании стыковых швов было предложено выполнять прессовую сваркопайку труб в твердой фазе с использованием формирующего устройства.

Такой процесс стыковой сваркопайки в твердой фазе осуществляется следующим образом. На кромки свариваемых деталей предварительно наносят смесь припоев и активирующих веществ, зону шва защищают посредством флюсов. После достижения кромками заготовок необходимой темпера-

туры, при которой происходит плавление активирующих веществ, нагрев прекращается. В этот же момент над плоскостью шва располагается формирующее устройство и осуществляется осадка. Формирование валика шва происходит с помощью кольцевого формирующего устройства (рис. 1, зажимы и механизм осадки не показаны). По описанной выше схеме способом сваркопайки выполнены сварные швы на трубных образцах диаметром 26×2,5 мм из стали 08кп (ГОСТ 1050–74), для чего использовали установку П-137 УХЛ 4, предназначенную для сварки и пайки давлением труб диаметром 21,3...60,0 мм, с номинальным усилием осадки 4,5 кН.

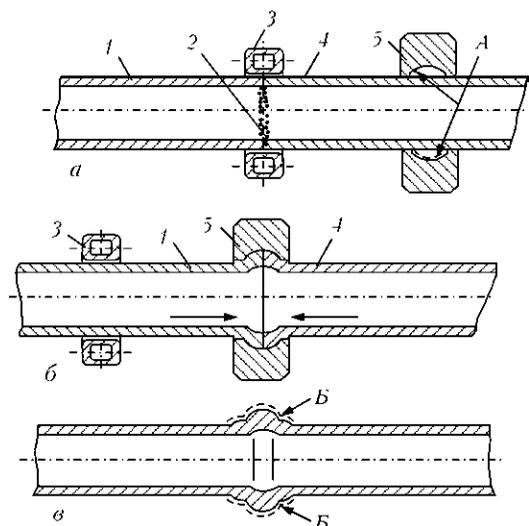


Рис. 1. Схема процесса индукционной сварки и сваркопайки труб с принудительным формированием шва: а, б — соответственно процесс нагрева и осадки; в — полученное сварное соединение: 1, 4 — трубные заготовки; 2 — смесь материалов для пайки и сварки; 3 — кольцевой индуктор; 5 — формирующее устройство; А — формирующая поверхность устройства; В — поверхность валика шва

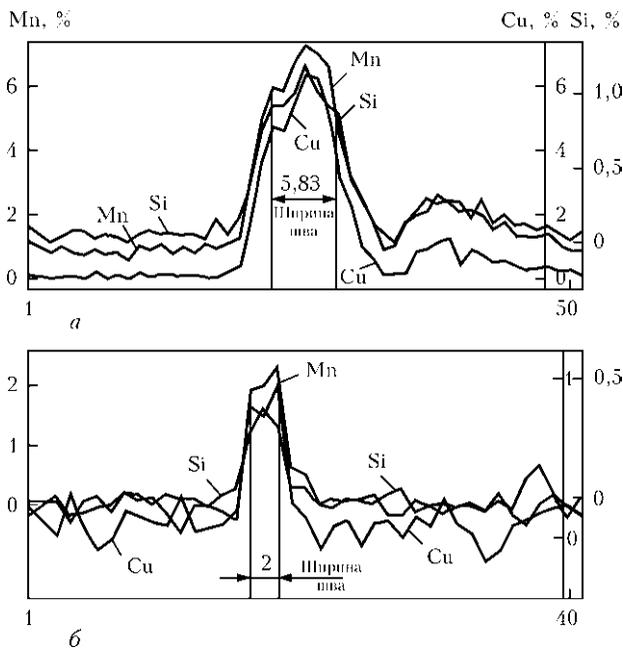


Рис. 2. Распределение элементов Mn, Cu, Si, определенное в первой (а) и второй (б) точке в поперечном сечении соединения с оптически выявляемым участком металла шва

Нагрев зоны соединения осуществляли генератором высокой частоты. Использовали преобразователь ПВВ-100/8000 об/мин 8000; генератор ГВВ-100/8000 частотой 8000 Гц; трансформатор закалочный ТЗЗ-800 УХЛ 4.

Химические составы металла трубных заготовок, припоя и металла шва, на которых проводили процесс сваркопайки, представлены в таблице. При этом использовали припой на основе никеля (около 67,298 % Ni), наносимый путем плазменного напыления перед проведением процесса сваркопайки на торцы заготовок и их наружную поверхность вблизи зоны соединения. При этом использовали припой на основе никеля (около 76,298 % Ni), наносимый путем плазменного напыления перед проведением процесса сваркопайки на торцы заготовок и их наружную поверхность вблизи зоны соединения.

Для исследования распределения основных химических элементов поперек сварного соединения проводили микрорентгеноспектральный анализ на приборе фирмы «Сомбах» (модель SX-50). Исследования проводили при перемещении микрозонда на расстоянии 50 мкм (шаг 1,02 мкм).

На рис. 2, 3 представлены микрорентгеноспектрограммы распределения химических элементов

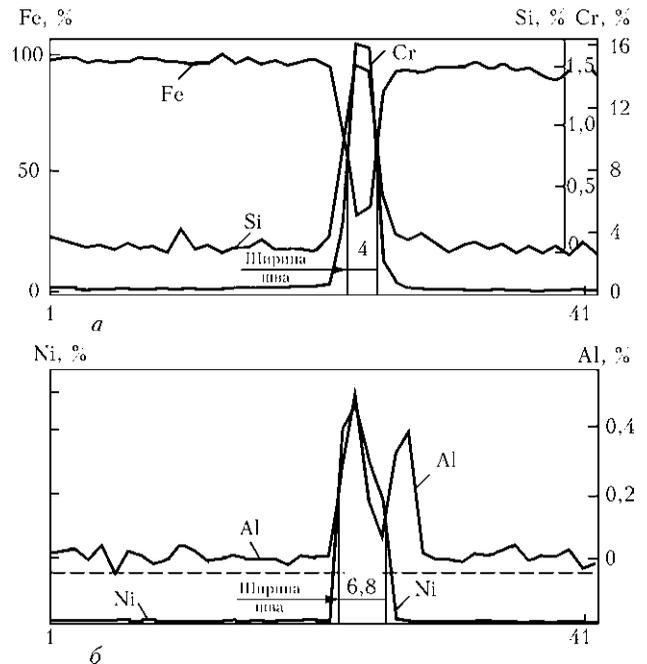


Рис. 3. Распределение элементов Fe, Si, Cr (а) и Ni и Al (б) в поперечном сечении соединения с оптически выявляемым участком металла шва

в поперечном сечении соединения с оптически выявляемым участком шва шириной 2...7 мм.

Исследование микроструктуры проводили в нескольких точках, на фрагментах сварного шва, где возможна визуализация невытесненной прослойки закристаллизовавшейся твердожидкой фазы.

Анализ проведен в четырех точках по семи основным химическим элементам. Измерена также микротвердость полученных швов и основного металла в околошовной зоне с помощью микротвердомера М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 25 г. Непосредственно перед процессом сварки на торцы трубных заготовок наносили порошкообразный флюс — буру  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  на связующем веществе.

Видно, что на закристаллизовавшихся участках металла шва основой является железо, доля которого вследствие диффузии его из металла заготовок в шов превысила 45 %. Доля железа в напыленном слое припоя составляла всего 3,7 %.

В момент прекращения нагрева в образовавшейся жидкой фазе в основном содержатся компоненты напыленного слоя припоя. При смачивании кромок основного металла жидкой фазой доля никеля как компонента припоя уменьшилась с 67,298 до 32,172 % в металле шва, хотя его доля

**Распределение основных химических элементов в основном металле, нанесенном припое и на оптически выявленных участках металла шва в сварных соединениях**

Исследуемый участок	Al	Si	Cr	Mn	Ni	Fe	Cu	Остальное
Основной металл	—	0,03	0,1	0,4	0,25	98,735	0,25	0,235
Нанесенный припой	2,673	2,359	14,012	0,26	67,298	3,736	0,374	9,287
Металл шва	0,381	1,691	16,772	0,339	32,172	45,688	0,439	2,516



в основном металле заготовок составляет всего 0,25 %.

Таким образом, произошла взаимная диффузия никеля из жидкой фазы в основной металл, и наоборот.

Известно, что глубина проникновения диффузионных потоков в основной металл в сварных соединениях железа с никелем, выполненных в вакууме  $3 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. при температуре  $1300 \pm 10$  °С и давлении 15 МПа, составляет примерно 20 мкм за время сварки 10 мин [7].

Применение пластической деформации и высокая скорость процесса сваркопайки (скорость деформации  $\dot{\epsilon} \geq 100 \dots 120 \text{ с}^{-1}$ ) [8] приводит к уменьшению как толщины шва до 2...7 мкм (рис. 2, 3), так и зоны диффузии в основном металле. В металле шва также увеличилась доля хрома до 16,772 % (хотя первоначально его доля в нанесенном припое составляла 14,012 %, а в основном металле — 0,1 %). Известно, что хром образует жаропрочные сплавы, в частности, и системы Cr–Ni, которые в процессе сварки находятся в зоне шва в твердотелом состоянии.

Температура проведения процесса сварки в твердой фазе (800...950 °С) также способствует образованию соединений хрома с углеродом, кремнием и другими примесями, в частности, с алюминием.

Доля марганца в металле шва составляет 0,339 %, что меньше чем в основном металле (0,4 %). Еще меньше марганца в нанесенном припое, где его доля составляет 0,26 %.

При нагреве и образовании жидкой фазы марганец активно взаимодействует с неметаллами — примесями, в частности, с углеродом, азотом и фосфором.

Данные таблицы свидетельствуют о снижении доли примесей в металле шва по сравнению с их наличием в нанесенном припое. Так, произошло снижение доли кремния с 2,359 в нанесенном припое до 1,691 % в металле шва, а доли алюминия с 2,673 до 0,381 % соответственно. Доля остальных элементов, в том числе и примесей, снизилась с 9,287 в нанесенном припое до 2,516 % в металле шва.

При нагреве первоначально неметаллические примеси с повышением температуры диссоциируют из соединений, где они находятся. В дальнейшем происходит их диффузия в жидкую фазу, где они образуют новые соединения, в том числе и с элементами-компонентами припоя, а также увеличение их доли в составе жидкой фазы, вместе с которой они вытесняются из зоны шва в процессе осадки. Происходит возрастание доли меди в металле шва. Так, количество меди в основном металле заготовок составляет 0,25, в нанесенном покрытии — 0,374, а в металле шва — 0,439 %.

HV0,25, МПа

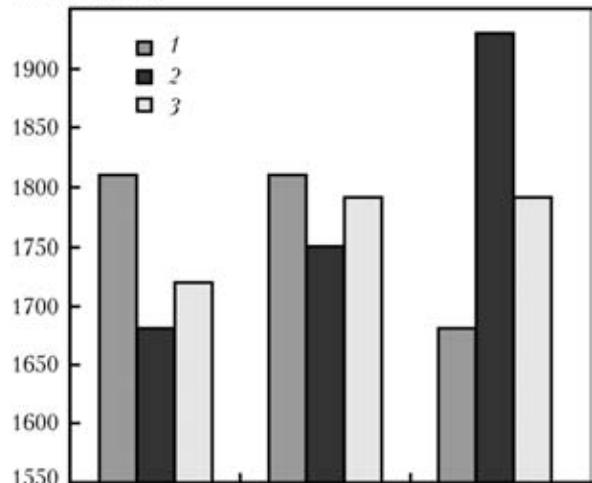


Рис. 4. Диаграмма распределения микротвердости в сварном соединении: 1 — металл шва; 2 — основной металл; 3 — линия сплавления

По-видимому, тут имеет место диффузия меди как из кромок основного металла, так и из нанесенного покрытия в жидкую фазу, фрагменты которой формируют линию сплавления.

Для определения сравнительных характеристик металла шва и околошовной зоны выполнили анализ микротвердости этих зон в образцах по известным методикам [9–14]. Соответственно микротвердость металла шва HV0,25 — 1680...1810 МПа; основного металла HV0,25 — 1680...1930 МПа; линии сплавления HV0,25 — 1720...1790 МПа.

На основании полученных данных на рис. 4 представлена диаграмма распределения микротвердости в сварном соединении. Разброс значений микротвердости от средней измеренной микротвердости шва, равной HV 1805 МПа, достигает 7 %. Эти данные свидетельствуют о близости прочностных свойств металла шва к свойствам основного металла [15].

В металле шва и околошовной зоне элементов активирующего вещества и участвующих в диффузионных процессах в виде отдельных закалочных структур и хрупких фаз не обнаружено.

В короткий промежуток времени, при достижении температуры плавления припоя и прекращении нагрева перед проведением осадки активизируются диффузионные процессы по границам контактного соприкосновения фаз.

При осадке в формировании шва принимают участие внутренние, наименее нагретые глубинные слои основного металла, которые расположены между срединным и внутренним диаметром трубной заготовки.

Наружная поверхность шва защищена от воздействия окружающей среды формирующим устройством, а само формирование шва происходит с термомеханическим воздействием в виде плас-

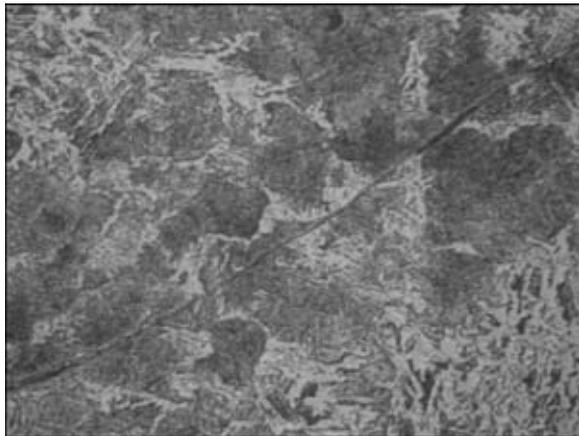


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 320$ ) участка сварного шва толщиной до 3,5 мкм

тического деформирования с последующей кристаллизацией под давлением, приближающимся к равномерному объемному напряженному состоянию, что дает более однородный состав металла шва по всей его протяженности [19].

В сформированном шве иногда по его длине фрагментарно встречаются участки прослойки шва, закристаллизовавшейся под давлением. Это не полностью выдавленные, пластически деформированные остатки металла, бывшего в твердом состоянии, и трансформированные в тонкую прослойку шва (рис. 5).

### Выводы

1. Применение формирующего устройства приводит к уменьшению толщины шва до 2...7 мкм и уменьшению ширины диффузионной зоны по сравнению с формированием шва в свободном состоянии.

2. В металле шва и околошовной зоне закалочных структур и хрупких фаз не обнаружено.

3. Следствием применения формирующего устройства является гомогенизация и образование однородного фазового состава металла шва и околошовной зоны.

The paper generalizes the results of assessment of the influence of a forming device on the properties of a circumferential butt joint forming in welding of tubular billets. Chemical element distribution and phase composition were studied in the metal of weld and HAZ forming during solid-state pressure butt braze-welding.

Поступила в редакцию 01.02.2010

1. Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С. Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 25–27.
2. Высокотемпературная пайка труб для геологоразведочного бурения / В. К. Лебедев, В. Д. Табелев, А. С. Письменный и др. // Там же. — 1989. — № 5. — С. 28–30.
3. Письменный А. С., Шинлов М. Е., Буженецкий А. И. Применение индукционной сваркопайки для соединения труб нефтяного сортамента // Там же. — 1995. — № 12. — С. 35–38.
4. Письменный А. С., Прокофьев А. С. Прессовая сварка труб с применением активирующих веществ // Там же. — 2002. — № 7. — С. 22–27.
5. Индукционная сваркопайка безарматурных тройниковых соединений труб / А. С. Письменный, А. С. Прокофьев, В. А. Бондарев, А. В. Бондарев // Там же. — 2001. — № 4. — С. 48–50.
6. Марочник сталей и сплавов: Справочник / Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
7. Лариков Л. Н., Рябов В. Р., Фальченко В. М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. — М.: Машиностроение, 1975. — 192 с.
8. Письменный А. С., Скачко Ю. Н. Высокочастотный нагрев. Нагрев металла при сварке давлением // Машиностроение. Т. III, IV. Технология сварки, пайки и резки / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — С. 54–58.
9. Давиденков Н. Н., Беляев С. Е., Марковец М. П. Получение основных механических характеристик стали с помощью измерений твердости // Зав. лаб. — 1945. — № 10. — С. 964–973.
10. Сичиков М. Ф., Захаров Б. П., Козлова Ю. В. Об определении механических свойств стали без испытаний разрывных образцов // Там же. — 1947. — № 12. — С. 1463–1471.
11. Кучук-Яценко С. И., Казымов Б. И. Оптимальный термический цикл при контактной стыковой сварке стали 12Х1МФ // Автомат. сварка. — 1967. — № 6. — С. 24–27.
12. Форостовец Б. А. Особенности структуры металла соединений при сварке оплавлением // Там же. — 1972. — № 4. — С. 9–13.
13. Марковец М. П. Определение механических свойств металла по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
14. Гуляев А. П. К вопросу о механических свойствах конструкционных сталей // Метал. и терм. обработка материалов. — 1989. — № 7. — С. 23–25.
15. Шмыков А. А. Справочник термиста. — М.: Машгиз, 1956. — 332 с.



## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 10X13Г18Д+09Г2С

**А. И. ГЕДРОВИЧ**, д-р техн. наук, **С. А. ТКАЧЕНКО**, инж. (Восточноукр. гос. ун-т им. В. Даля),  
**И. А. ГАЛЬЦОВ**, канд. техн. наук (Луган. нац. аграр. ун-т)

Рассмотрены особенности определения остаточных сварочных напряжений на натуральных образцах из разнородных сталей 10X13Г18Д+09Г2С. Установлена зависимость размера зоны пластических деформаций и продольных остаточных сварочных напряжений от используемых технологий сварки в защитных газах, режимов, погонных энергий. Подтверждено положительное влияние технологии холодного переноса металла (СМТ) на величину остаточных напряжений и размеры зон пластической деформации в соединениях разнородных сталей.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, режимы сварки, погонная энергия, сварные швы, околошовная зона, зона пластической деформации, магнитные свойства

Эксплуатируемые в настоящее время в Украине и странах СНГ вагоны дизель- и электропоездов имеют двухдверное исполнение, длину вагонов до 21,5 м, максимальную вместимость до 240 чел. Кузова вагонов выполнены из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в виде листового, сортового, фасонного проката (в том числе холодногнутых профилей) и стальных отливок, отдельные элементы которых, как показывает статистика, из-за большой коррозии требуют ремонта или замены уже через 5-6 лет эксплуатации [1].

Важнейшим направлением развития конструкции электро- и дизельпоездов данного типа является максимальное снижение массы конструкции при сохранении или увеличении количества посадочных мест с одновременным обеспечением необходимых технических требований [2]. Детали и узлы вагонов при эксплуатации, наряду с многочисленными механическими и знакопеременными динамическими нагрузками, подвержены коррозии, абразивному износу, температурным колебаниям.

На основании опыта эксплуатации и экспериментально-теоретических исследований ВНИИЖТ и ВНИИВ рекомендуют стали для вагоностроения, имеющие следующие механические характеристики:  $\sigma_{\text{в}} = 500 \dots 550$  МПа,  $\sigma_{\text{т}} = 400$  МПа,  $\delta = 21$  %. Применяемые в настоящее время низкоуглеродистые и низколегированные стали не соответствуют указанным выше требованиям.

В мировой практике имеется опыт применения в транспортной промышленности нержавеющей хромоникелевых сталей аустенитного класса для обшивки вагонов с целью достижения более продолжительного ресурса их эксплуатации.

Для обеспечения необходимых требований и экономии дорогостоящего никеля ЦНИИЧерметом им. И. П. Бардина (г. Москва, Россия) разработана и рекомендована для производства вагонов нержавеющая безникелевая сталь марки 10X13Г18Д [3] вместо сталей 12X18Н10Т, 08X18Н10. Эта сталь отличается высокой пластичностью при штамповке и кавитационной стойкостью, поэтому ее целесообразно применять для обшивки кузова, а более дешевые низколегированные стали 09Г2С повышенной прочности — для каркасных элементов кузовных конструкций вагонов. Применение стали 09Г2С для каркасных элементов кузова позволяет уменьшить толщину деталей с 3,0...8,0 до 2,5...7,0 мм, а использование нержавеющей стали 10X13Г18Д в холоднодеформированном состоянии — толщину обшивки с 2,5 до 1,5 мм. В результате ожидается, что при значительном увеличении габаритов вагона масса останетс я неизменной, а его срок службы увеличится.

Известно, что работоспособность сварных конструкций в значительной мере зависит от термомеханических процессов, происходящих в области сварного шва, значений пластической деформации и уровня продольных  $\sigma_x$  остаточных напряжений [4, 5], которые в сварных соединениях могут достигать предела текучести  $\sigma_{\text{т}}$  свариваемого металла и более, а поперечные напряжения  $\sigma_{\text{н}}$  при плоском напряженном состоянии могут не превышать  $0,75\sigma_{\text{т}}$  [4]. Поэтому целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования зоны пластических деформаций и продольных остаточных напряжений при сварке разнородных сталей 10X13Г18Д+09Г2С.

Работу выполняли экспериментально. Многочисленными исследованиями [3–8] показано, что в результате воздействия сварочного термомеханического цикла в сварных соединениях и узлах образуются остаточные сварочные напряжения, ко-



Рис. 1. Лабораторная установка для сварки образцов разнородных сталей 10X13Г18Д+09Г2С

торые при сварке низкоуглеродистых конструкционных сталей могут превосходить предел текучести материала, а при сварке хромомарганцевых коррозионноустойчивых сталей достигать предела текучести [6]. Продольные остаточные напряжения, как правило, растягивающие, и являются следствием различной степени пластической деформации при сварочном нагреве и охлаждении [5]. При сварке конструкционных сталей (Ст3, 14Г2 и др.) закономерности их распределения в активной зоне достаточно хорошо изучены, а пластическая деформация в ней достигает 1...2% [4, 5].

Различия в формировании продольных  $\sigma_x$  остаточных напряжений при сварке перлитной стали 09Г2С и аустенитной стали 10X13Г18Д обусловлены тем, что нержавеющие аустенитные стали имеют низкий коэффициент теплопроводности, высокий коэффициент линейного расширения и склонны к упрочнению. Наличие пластической деформации и полей высоких остаточных растягивающих напряжений 1 рода согласно работе [6], в области шва и околошовной зоне приводит к распаду аустенита, т. е. фазовому превращению и появлению  $\alpha$ -фазы. По содержанию  $\alpha$ -фазы в сварном соединении можно качественно судить о распределении остаточных сварочных напряжений [6, 7] в этой зоне. В данной работе зону пластических деформаций на участке сварного соединения со стороны перлитной стали определяли по полосам текучести [4], а остаточные продольные напряжения — по изменению магнитных свойств стали (магнитной проницаемости) [5]. Для исследований использовали пластины разме-

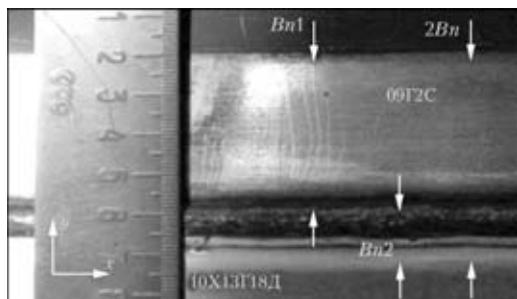


Рис. 2. Размеры зон пластической деформации  $Bn1$ ,  $Bn2$ ,  $2Bn$  образца нахлесточного сварного соединения сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученного при сварке полуавтоматом А-547У

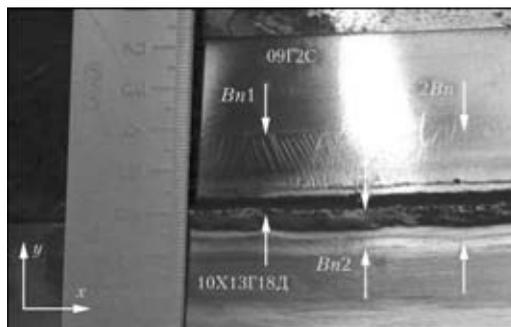


Рис. 3. Размеры зон пластической деформации  $Bn1$ ,  $Bn2$  образца нахлесточного сварного соединения сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученного при сварке полуавтоматом TRS-3200 СМТ

ром 125×300×1,5 мм (сталь 10X13Г18Д). Толщина соответствовала толщине металла обшивки вагона и пластины размером 125×300×2,5 мм (7 мм) из стали 09Г2С. Большая толщина соответствовала соединению обшивки с каркасом кузова вагона. Образцы предварительно шлифовали и полировали. Полированные образцы собирали внахлестку и их сварку проводили полуавтоматами А-547У и TRS-3200 СМТ (рис. 1). При этом использовали сварочную проволоку марки Св-08Х20Н9Г7Т диаметром 1,2 мм в среде защитных газов ( $Ar + CO_2$ ) в сборочном приспособлении «кондуктор», а также СМТ-технологию.

При сварке полуавтоматом А-547У применяли следующий режим:  $I = 110...120$  А;  $U_d = 20...21$  В;  $v_{CB} = 17...22$  м/ч;  $q_{CB} = 3350$  Дж/см; полуавтоматом TRS-3200 СМТ:  $I = 106$  А;  $U = 15,9$  В;  $v_{CB} = 38,2$  м/ч;  $q_{CB} = 1105$  Дж/см.

Зону пластических деформаций  $Bn2$  (рис. 2, 3) на аустенитной стали 10X13Г18Д вытраивали после сварки реактивом Фрая, после проявления границ зоны реактив смывали спиртом, образец сушили, затем проводили травление реактивом Амберга–Каллинга. После четкого проявления границ пластической деформации образец протирали спиртом и сушили [6].

Зону пластических деформаций  $Bn1$  (рис. 2, 3) на участке сварного соединения со стороны перлитной стали 09Г2С определяли по полосам текучести — линиям Чернова–Людерса. Продольные остаточные напряжения  $\sigma_x$  в стали 10X13Г18Д оценивали согласно методикам работы [5]. Общую ширину зоны пластических деформаций разнородного соединения 10X13Г18Д+09Г2С —  $2Bn$  после травления определяли в центральной части сварного соединения переносным бинокулярным микроскопом МПБ-3. Погрешность измерений составила 0,025 мм. Для расчета среднего значения проводили пять измерений. Для исключения влияния краевого эффекта концевые участки длиной по 60 мм не рассматривали. Эксперимент повторяли трижды. Поэтому среднее значение зоны  $2Bn$  определяли по данным, полученным из 15 наблюдений.



Ф отосъемку проводили цифровым фотоаппаратом.

После полного остывания сварного соединения определяли распределение остаточных продольных напряжений  $\sigma_x$  вдоль оси  $OY$ . В аустенитной стали 10X13Г18Д возникают растягивающие напряжения, так как она имеет значительно большее уменьшение объема по сравнению с ферритно-перлитной сталью 09Г2С, а на участке ферритно-перлитной стали — уравнивающие их напряжения сжатия (рис. 4). Поля остаточных напряжений в одно- и разнородных соединениях близки между собой и отличаются лишь некоторым смещением эпюры в сторону стали с меньшей теплопроводностью (в данном случае в сторону аустенитной стали) (рис. 5). Эти напряжения в большинстве случаев не могут быть сняты термообработкой и создают опасность как эксплуатационных разрушений, так и изменения размеров конструкции во времени. Сравнив эпюры остаточных напряжений  $\sigma_x$  и размеры зоны пластических деформаций в сварных соединениях, полученных при сварке образцов полуавтоматами А-547 и TRS-3200 СМТ, можно сделать следующие выводы: на образцах из сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) + 09Г2С (2,5 мм) при сварке полуавтоматом TRS-3200 СМТ наблюдается уменьшение уровня растягивающих напряжений  $\sigma_x$  на 5,3 %, а размер зоны пластической деформации  $2Bn$  — на 45,5 %; на образцах из сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм)+09Г2С (7 мм) при сварке полуавтоматом TRS-3200 СМТ имеет место уменьшение уровня растягивающих напряжений  $\sigma_x$  на 5,3 %, а размер зоны пластической деформации  $2Bn$  — на 21,3 %.

На основе анализа зон пластической деформации  $2Bn$  сварного соединения 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) и 09Г2С (2,5 мм) и эпюр остаточных напряжений  $\sigma_x$  в образцах при сварке полуавтоматом А-547У (рис. 4), можно выделить следующие напряженные зоны:

1 — зона сжимающих напряжений  $\sigma_x$  (около 16 мм) находится в основном металле ЗТВ (со стороны аустенитной стали), не претерпевает при сварке пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений  $-45$  МПа, среднее значение  $-27$  МПа; 2 — зона максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_x$  (около 6 мм). Металл находится также в ЗТВ и претерпевает в процессе сварочного цикла пластическую деформацию. Уровень максимальных сжимающих напряжений  $-50$  МПа, среднее значение  $-40$  МПа; 3 — зона максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_x$ . Шов и околошовная зона (около 9 мм) со стороны аустенитной стали находятся в области пластических деформаций. Уровень максимальных растягивающих напряжений  $475$  МПа, среднее значение

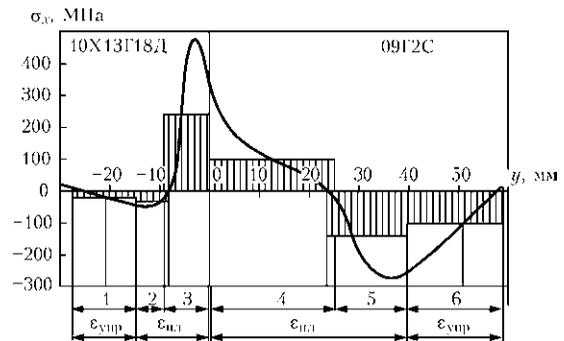


Рис. 4. Характерные напряженные зоны сварного соединения сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученного при сварке полуавтоматом А-547У (1–6 — номер зоны)

250 МПа; 4 — зона максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_x$ . Шов и околошовная зона (ширина около 23 мм) со стороны ферритно-перлитной стали находятся в области пластических деформаций. Уровень максимальных растягивающих напряжений 350 МПа, среднее значение 100 МПа; 5 — зона максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_x$  (около 17 мм) находится в основном металле, который подвергается в процессе сварки пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений  $-270$  МПа, среднее значение  $-140$  МПа; 6 — зона сжимающих напряжений (около 19 мм) находится в основном металле, который не подвергается при сварке пластической деформации.

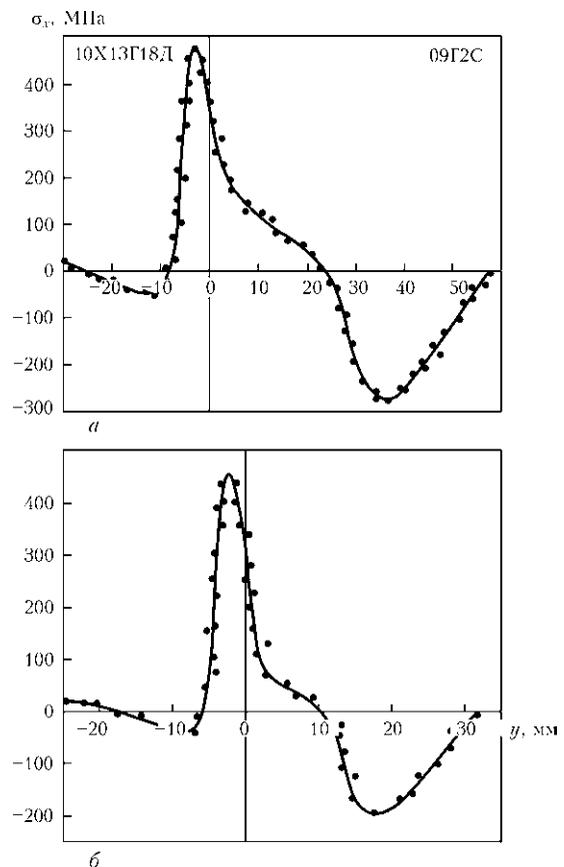


Рис. 5. Эпюры остаточных напряжений  $\sigma_x$  в сварных соединениях сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) + 09Г2С (2,5 мм), полученных полуавтоматом А-547У (а) и TRS-3200 СМТ (б)

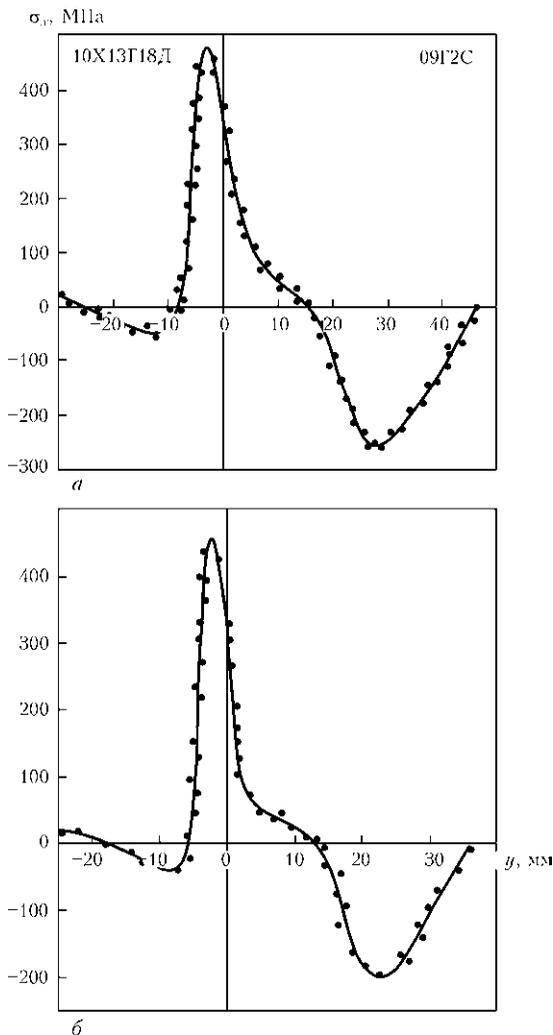


Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений  $\sigma_x$  в сварном соединении сталей 10X13Г18Д ( $\delta = 1,5$  мм) + 09Г2С (7 мм), полученном полуавтоматом А-547У (а) и TRS-3200 СМТ (б)

тической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений  $-230$  МПа, среднее значение  $-100$  МПа.

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что в зоне 3 и 4 наблюдаются максимальные растягивающие остаточные напряжения, превышающие предел текучести материала ( $\sigma_T = 450$  МПа) на 6,6 %. Зоны пластической деформации при сварке образцов с использованием полуавтомата TRS-3200 СМТ идентичны описанным выше и отличаются только размерами зон пластической деформации и значениями напряжений.

Для подтверждения достоверности данных, полученных в результате проведенных экспериментов по определению размера зон пластических де-

формаций  $2Bn$ , которые возникают в сварных соединениях из разнородных сталей (10X13Г18Д+09Г2С), проведен их теоретический расчет по методу, описанному в работе [4]. За базу для расчета и сравнительного анализа были взяты данные, полученные при сварке образцов полуавтоматом А-547У и TRS-3200 СМТ.

Сопоставление данных о размерах зон пластических деформаций показало, что расхождение между экспериментом и теоретическим расчетом не превышает 5 %.

### Выводы

1. Экспериментально определен размер зоны пластической деформации  $2Bn$  при сварке разнородных сталей, которая состоит из зоны пластической деформации  $Bn1$  (ЗТВ со стороны ферритоперлитной стали) и  $Bn2$  (ЗТВ со стороны аустенитной стали), причем  $Bn1 > Bn2$ .

2. Установлено наличие значительных растягивающих продольных напряжений  $\sigma_x$  в металле ЗТВ со стороны аустенитной стали и сжимающих напряжений в металле ЗТВ со стороны феррито-перлитной стали.

3. Экспериментально подтверждено преимущество применения технологии СМТ для достижения минимальной зоны пластических деформаций в сварных соединениях разнородных сталей.

1. Басов Г. Г., Голубенко А. Л., Мищенко К. П. Концепция создания типажа современного мотор-вагонного подвижного состава для украинских дорог // Сб. науч. тр. по проблемам внедрения и освоения производства в Украине мотор-вагонного подвижного состава на базе унифицированного прицепного вагона. — Луганск: Машиностроение, 2003. — С. 17–21.
2. Березницкий В. А., Сергиенко Н. И., Щербаков В. П. Использование нержавеющей и низколегированных сталей для вагонов дизель- и электропоездов максимальной вместимости // Там же. — Луганск: Машиностроение, 2003. — С. 85–87.
3. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1985. — 408 с.
4. Гедрович А. И. Пластическая деформация при сварке. — Луганск: Изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1998. — 237 с.
5. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. — Киев: Вища шк., 1987. — 246 с.
6. Особенности формирования структуры и свойств зоны сплавления стали 10X13Г18Д / А. И. Гедрович, А. Н. Ткаченко, Ткаченко С. М. и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 4. — С. 23–28.
7. Сагалевиц В. М., Савельев В. Ф. Стабильность сварных соединений и конструкций. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.
8. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. — М.: Наука, 1977. — 236 с.

A method is proposed, and features of determination of residual welding stresses on full-scale samples from 10Kh13G18D+09G2S dissimilar steels are considered. A dependence is established between the size of the zone of plastic deformations and longitudinal residual welding stresses on the applied technologies of gas-shielded welding, modes, and heat inputs. Positive influence of the technology of cold metal transfer on residual stresses and dimensions of plastic deformation zones in dissimilar steel joints is confirmed.

Поступила в редакцию 04.02.2010

## ПРЕССОВАЯ СВАРКА МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ ТРУБ ИЗ СТАЛИ X70

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. С. КАЧИНСКИЙ, канд. техн. наук,  
В. Ю. ИГНАТЕНКО, Е. И. ГОНЧАРЕНКО, М. П. КОВАЛЬ, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены материалы исследования свариваемости труб диаметром 168×7 мм из стали X70 для применения в различных по назначению трубопроводах, а также результаты металлографических исследований и механических свойств сварных соединений.

*Ключевые слова:* прессовая сварка, магнитоуправляемая дуга, трубная сталь X70, трубопроводы, формирование соединения, технология сварки

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на протяжении последних лет проводятся исследования по сварке труб и трубопроводов диаметром до 219 мм и толщиной стенки до 16 мм [1]. Результаты исследований показали возможность практического применения прессовой сварки магнитоуправляемой дугой (ПСМД) для сварки труб и трубопроводов. Процесс ПСМД отличается высокой производительностью (время сварки 20...50 с), минимальным расходом основного металла труб, равным толщине стенки, при этом дополнительные сварочные материалы и расходный газ не требуются.

Целью настоящей работы является исследование свариваемости стали X70 способом ПСМД. Для исследований использовали трубы диаметром 168 мм с толщиной стенки 7 мм. Выбор был связан с потребностями различных отраслей промышленности и строительства в разработке новых высокопроизводительных способов сварки труб и трубопроводов небольшого диаметра. Сталь X70 относится к низкоуглеродистым сталям со следующим химическим составом, мас. %: 0,030 С; 0,156 Si; 1,45 Mn; 0,004 S; 0,004 P; 0,07 Cr; 0,14 Ni; 0,20 Mo; 0,02 V; 0,30 Cu; 0,033 Al; 0,022 Ti; 0,062 Nb; 0,012 As.

Особенности формирования соединений при ПСМД, а также основные параметры, определяющие качество соединений, рассмотрены в работах [1, 2]. Основные технологические параметры сварки труб диаметром 168×7 мм из стали X70 следующие (рис. 1): время сварки 34,7 с; усилие осадки 247 кН; укорочение труб 7,5...7,9 мм; потребляемая мощность 28,7 кВт.

С целью проведения механических испытаний из сварного соединения трубы вырезали секции.

Формирование сварного соединения с внешней и внутренней сторон трубы приведено на рис. 2.

Результаты механических испытаний показали, что прочностные и пластические свойства сварного соединения находятся на уровне показателей основного металла (табл. 1, рис. 3).

Структура металла в ЗТВ при ПСМД во многом подобна структуре аналогичных соединений

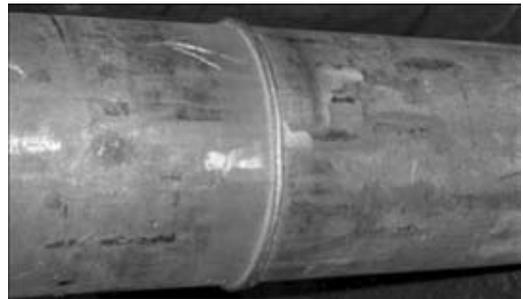


Рис. 1. Сварное соединение труб диаметром 168×7 мм из стали X70

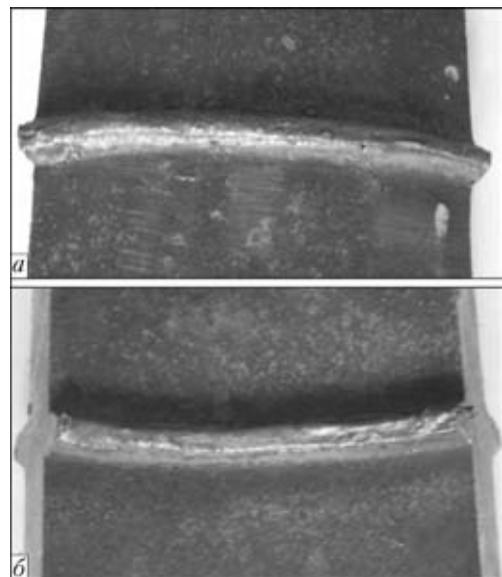


Рис. 2. Формирование сварного соединения с внешней (а) и внутренней (б) сторон труб



Т а б л и ц а 1. Механические свойства основного металла и сварного соединения труб из стали X70

Участок испытания	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$KCV_{+20^\circ C}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Основной металл	448,9...469,1	528,8...566,8	248,4...265,7
	460,6	551,0	256,5
Сварное соединение	411...440	511...556	124,8...283,4
	425,5	533,5	204,1

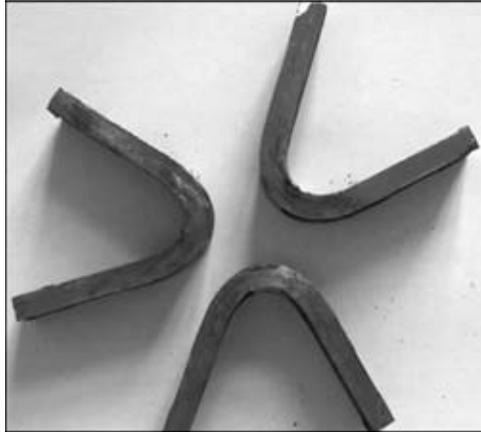


Рис. 3. Результаты испытаний сварного соединения на изгиб

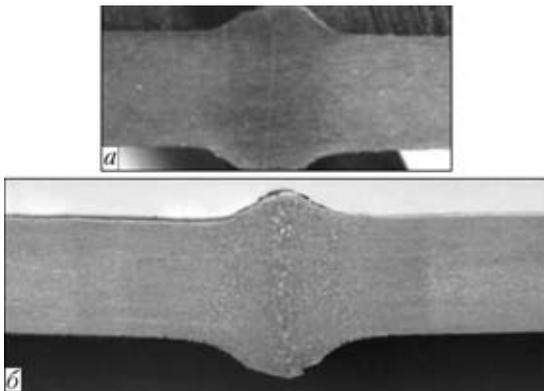


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений стали X70, выполненных ПСМД (а) и КССО (б)

труб, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением (КССО), но в формировании центральной части соединения есть отличия. Анализ макроструктуры соединений труб диаметром 168X7 мм из стали X70 (рис. 4, а) показал, что

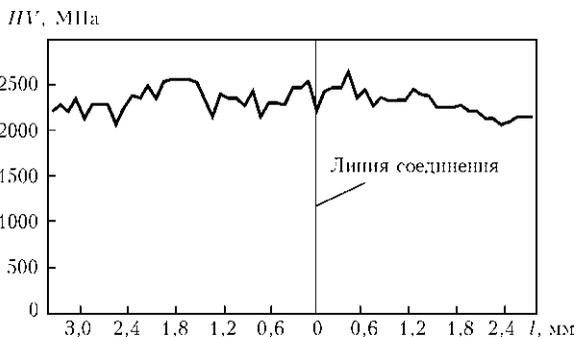


Рис. 5. Распределение микротвердости металла в зоне сварного соединения

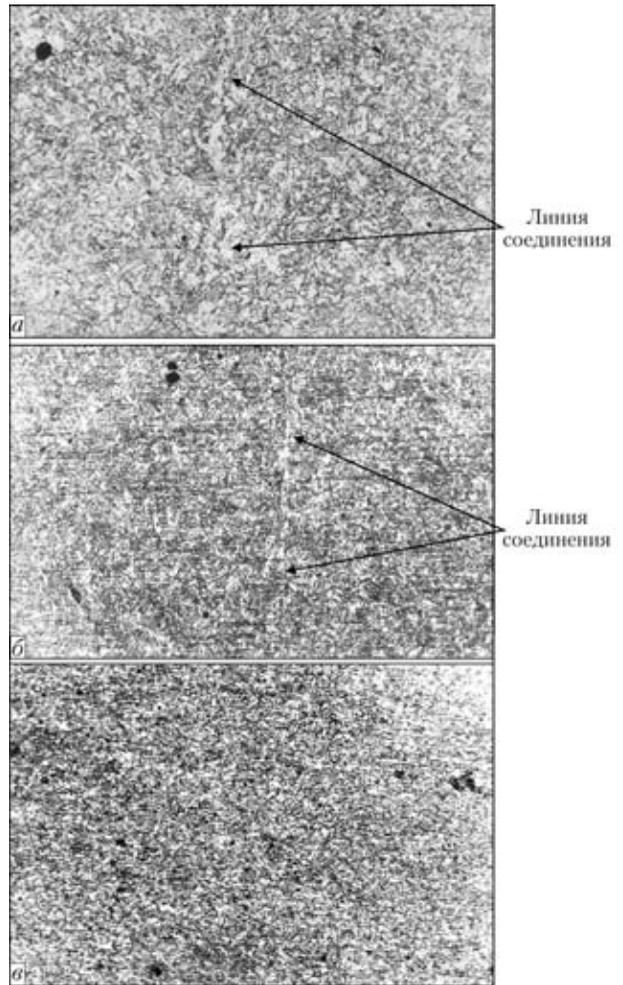


Рис. 6. Микроструктуры (X150) сварного соединения вблизи внешней кромки (а), в центральной области (б) и основного металла (в)

ширина ЗТВ при ПСМД не более 10 мм, а ширина участка нормализации по средней линии 2 мм. При КССО ширина ЗТВ и участка нормализации соответственно 18 и 6 мм (рис. 4, б). Таким образом, при ПСМД ЗТВ существенно уже, чем при КССО, что обеспечивает формирование более мелкозернистой структуры.

Область сварного соединения стали X70 подвергли металлографическим исследованиям. Микротвердость сварного соединения измеряли на приборе М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 1 Н и с шагом 100 мкм. Образец травили в 4%-м растворе HNO<sub>3</sub> в спирте.

Из рис. 5 видно, что в соединении имеет место незначительное повышение микротвердости ферритной полоски до HV 2450 МПа, что выше микротвердости основного металла труб. При КССО обычно наблюдается снижение микротвердости на этом участке.

Линия соединения представляет собой прерывистую белую полосу толщиной до 10 мкм в центральной области сварного соединения и расширяется до 30 мкм к краям образца шлифа (рис. 6, а). Микротвердость ферритной полоски линии со-

Таблица 2. Технические характеристики установок для ПСМД

Тип установки	Диаметр свариваемых труб, мм	Толщина стенки, мм	Производительность, стыков/ч	Потребляемая мощность, кВт·А	Масса, кг
К-980	50...140	3...10	80	80	3500
К-872	89...219	2,5...8	60	90	2500
К-981	120...250	3...10	50	160	4500

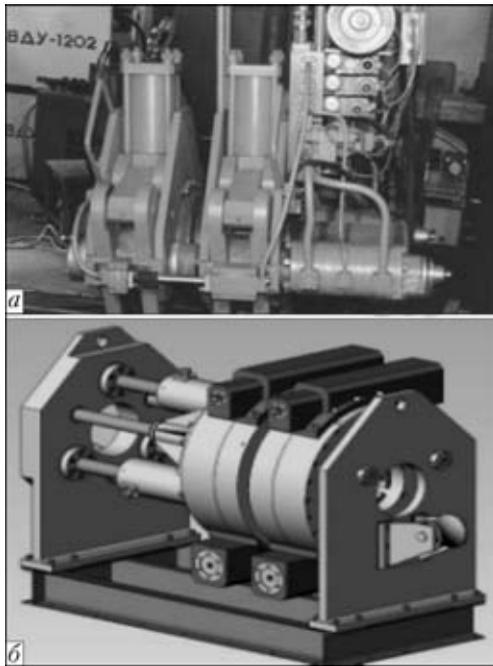


Рис. 7. Внешний вид установок К-872 (а) и К-981 (б)

единения  $HV$  2050...2450 МПа. Структура участка в центральной области образца мелкозернистая (8-9 балл по ГОСТ 5639–82) ферритно-перлитная с микротвердостью  $HV$  2470...2640 МПа (рис. 6, б). У края образца структура более крупнозернистая (7 балл) с преобладанием ферритной составляющей и микротвердостью  $HV$  2190...2350 МПа (рис. 6, а). На участке мелкого зерна структура мелкозернистая ферритно-перлитная с баллом 10-11 и микротвердостью  $HV$  2270...2400 МПа.

Основной металл мелкозернистый с преобладанием ферритной составляющей (балл зерна 10) и микротвердостью  $HV$  2130...2360 МПа (рис. 6, в).

На участке крупного зерна повышается количество перлитной составляющей в сравнении с основным металлом и другими участками ЗТВ, что приводит к незначительному повышению

твердости на этом участке. Дефектов в сварном соединении не обнаружено.

Проведенные исследования показывают, что структура и механические свойства соединений трубных сталей X70, выполненных ПСМД, весьма близки к аналогичным показателям соединений КССО. Поэтому принятые при КССО системы и методики неразрушающего, а также операционного контроля могут быть идентичными.

Для ПСМД труб и трубопроводов разработаны машины, обеспечивающие сварку в полевых и стационарных условиях (табл. 2).

Установки К-980, К-872, К-981 (рис. 7), предназначенные для прессовой сварки труб и трубопроводов различного назначения, состоят из сварочной головки; гидравлической насосной станции; шкафа управления с переносным пультом управления; источника питания дуги.

Подвесная головка К-872 является установкой клещевого типа, отличительной особенностью которой является отдельное зажатие свариваемых труб. Машина конструктивно имеет возможность загрузки-выгрузки свариваемых труб на сторону [3].

Установки К980 и К-981 — проходного типа, отличительной особенностью которых также является отдельное зажатие свариваемых труб. Конструкция машины проходного типа обеспечивает высокую точность осевой центровки сваренных труб и трубопроводов [4].

## Выводы

1. Определены основные условия прессовой сварки для формирования сварного соединения из стали X70.
2. Разработана технология сварки труб диаметром 168×7 мм из стали X70.
3. Разработано сварочное оборудование и технология прессовой сварки труб диаметром до 250 мм и толщиной стенки до 12 мм.

1. Кучук-Яценко С. И., Качинский В. С., Игнатенко В. Ю. Прессовая сварка толстостенных труб с нагревом дугой, управляемой магнитным полем // Автомат. сварка. — 2002. — № 7. — С. 28–34.
2. *Magnetically impelled arc butt welding of town gas pipelines* / K. Fakagi, F. Aracida, S. Sato et al. // Metal Construction. — 1982. — № 10. — P. 542–548.
3. Пат. 45449 Україна. Машина для пресоного зварювання з нагріванням дугою, керованою магнітним полем / С. І. Кучук-Яценко, В. С. Качинський, В. О. Сахарнов та ін. — Чинний з 15.04.2002 р.
4. Пат. 200713302 Україна. Машина для стикового зварювання труб / С. І. Кучук-Яценко, В. С. Качинський, В. О. Галян та ін. — Чинний з 29.11.2007 р.

The paper gives the materials of investigation of weldability of pipes of 168×7 mm from X70 steel for application in pipelines for various purposes, as well as the results of metallographic and mechanical property investigations of welded joints.

Поступила в редакцию 23.02.2010



## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСОВ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

**М. М. САВИЦКИЙ, А. С. ПИСЬМЕННЫЙ**, доктора техн. наук, **Е. М. САВИЦКАЯ**, канд. техн. наук,  
**С. И. ПРИТУЛА, С. К. БАБЕНКО**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны конструкция и технология изготовления комбинированных баллонов высокого давления с массогабаритным показателем  $M/V \leq 0,65$  кг/л, предназначенных для использования на автотранспорте. Баллон состоит из герметичного корпуса и упрочняющей композиционной оболочки. Для изготовления корпуса баллона, сваренного из тонколистового стального проката, разработаны нестандартное сборочно-сварочное оборудование и технология прецизионной сварки, последующего контроля и термообработки сварных соединений. Созданы технологические линии производительностью до 20 и 100 тыс. баллонов в год с запасом прочности их свыше 2,6.

*Ключевые слова: дуговая сварка, автотранспортные баллоны, высокое давление, долговечность оборудования и технологии сварки, прямошовные и спиральношовные обечайки, технологические линии*

Природный газ–метан является одним из наиболее распространенных и перспективных энергоносителей на Земле. Его разведанные запасы приближаются к  $10^{12}$ , а прогнозируемые (с учетом гидратов) к  $10^{15} \dots 10^{16}$   $\text{м}^3$  [1]. Добыча и подготовка к использованию газа экономически и экологически менее затратны по сравнению с нефтью, а сжигание обуславливает более низкое (в 1,5...2,5 раза) содержание оксидов углерода и азота, а также ароматических углеводородов в продуктах сгорания [2]. Кроме того, стоимость газа примерно в 2 раза ниже стоимости бензина, а его использование в качестве моторного топлива не требует изменения конструкции двигателей и не исключает возможности их эксплуатации на газе, бензине или их смесях [3]. При этом некоторые неудобства доставляет размещение дополнительных заправочных емкостей (баллонов высокого давления) на борту автомобиля. В связи с этим некоторые фирмы доработали конструкцию кузовов и начали выпуск автомобилей со встроенными баллонами.

Требования к баллонам достаточно высокие [4] и для их производства необходим определенный уровень технологической дисциплины и механизации работ. Это является предпосылкой для организации высокотехнологичных производств, а современные темпы автомобилизации мира и расхода нефтересурсов позволяют прогнозировать перспективность этих производств. Кроме того, около 900 млн зарегистрированных транспортных средств выбрасывают до 60 % всех загрязнений

в окружающее пространство. Поэтому на данном этапе применение газа в качестве моторного топлива позволит существенно снизить загрязнение среды обитания и отдалить коллапс автомобильной промышленности из-за исчерпания запасов нефти, а также разработать более приемлемые решения, например, получение топлива, в том числе газа, из возобновляемых источников, гибридные автомобили «газ–электроэнергия» и т. п.

Проблемой газификации автотранспорта занимались еще в прошлом веке, но это были в основном пионерные проекты, которые позволили накопить опыт и подготовить базу для перехода к масштабным решениям.

В настоящее время на природном газе эксплуатируется около 9 млн автомобилей, в которых в основном используется сжатый газ, поскольку существующие криобаки для сжиженного метана не обеспечивают его длительное хранение на борту, а большинство автомобилей используется с достаточно большими перерывами, т. е. отсутствует альтернатива баллонам высокого давления.

На данном этапе большое распространение получили стальные баллоны, изготовленные из цельнотянутой трубной заготовки путем горячей завальцовки концов [5]. Эта технология была ранее отработана на баллонах для технических газов и привлекает производителей доступностью и несложностью. Однако организовать в Украине массовое производство этих баллонов пока не удастся из-за трудности получения трубной заготовки без расслоений и с малыми допусками на толщину стенки. Кроме того, формирование днищ завальцовкой можно осуществлять только при определенном отношении диаметра к толщине стенки трубы. Это ограничивает возможность изготов-

ления баллонов различных типоразмеров со стабильным массогабаритным показателем (отношение массы к объему  $M/V$ ) не более 1 кг/л. Дальнейшее снижение и стабилизация этого показателя реализовано в конструкции металлопластикового баллона со сварным корпусом из листового проката, предложенной ИЭС им. Е. О. Патона и Институтом механики [6]. Корпус состоит из прямошовной обечайки и приваренных к ней кольцевыми швами двух штампованных полуэллиптических днищ, в одно из которых вварена горловина. Поскольку корпус изготавливается из малопрочных низколегированных сталей (обечайка из стали 09Г2СФ толщиной 3 мм, а днища — из стали 09Г2С толщиной 6 мм), его усиливают несущей стекловолоконной оболочкой типа «кокон», выполненной по схеме продольно-поперечной намотки. Баллон имеет стабильный массогабаритный показатель  $M/V \approx 0,9$  кг/л, запас прочности не менее 2,6 и выдерживает до 40 тыс. заправок.

С точки зрения владельцев легкового транспорта баллоны данной конструкции имеют избыточную массу, а производителей — требуют повышенных затрат на формирование композиционной оболочки. Дальнейшее усовершенствование конструкции осуществили на основе высокопрочных сталей [7]. При этом использовали полусферические днища, в которых рабочие напряжения в 2 раза ниже, чем в цилиндрической части корпуса, что позволило отказаться от их дополнительного усиления, а равнопрочность всех элементов конструкции обеспечить кольцевой намоткой цилиндрической части баллона [8, 9]. Это существенно упростило технологию и оборудование для формирования оболочки.

Необходимый запас прочности новых баллонов в значительной мере определяется механическими свойствами стали, которые задаются исходной структурой и режимами термической обработки металла [10]. При статическом и динамическом нагружении внутренним давлением проблема равнопрочности сварных соединений была решена для различных уровней прочности, вплоть до 2000 МПа [11]. Однако при малоцикловом нагружении возможность использования такого решения не была подтверждена [12]. Негативную роль здесь играло несовершенство геометрических размеров соединения. Известно, что при сборке тонкостенных элементов корпуса весьма сложно обеспечить идеальную сборку свариваемых кромок вследствие овализации деталей после вальцевания и штампования. В результате нарушается плавность перехода от шва к основному металлу и увеличивается вероятность образования высоких локальных концентраций напряжений при рабочих нагрузках, что приводит к развитию микропластических деформаций и

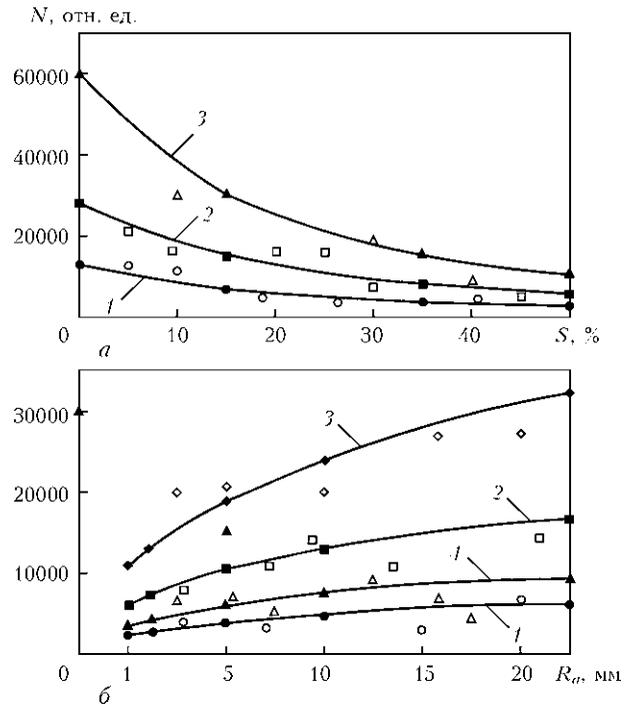


Рис. 1. Зависимость долговечности баллона от геометрических параметров сварного соединения: смещения кромок (а) и радиуса сопряжения шва с основным металлом (б) при различных уровнях относительного удлинения металла: 1 —  $\delta = 8$ ; 2 — 12; 3 — 18; 4 — 10 %; светлые значки — реальные баллоны

преждевременному исчерпанию запаса прочности металла в ограниченных участках.

Достижимое количество циклов нагружения (СТ СЭВ 3648–82)  $[N]$  определяется выражением

$$[N] = \frac{1}{n_N} \left[ \frac{A}{\left( \sigma_A - \frac{B}{n_\sigma} \right)} \left( \frac{2300 - t}{2300} \right) \right]^2,$$

где  $n_N$  — коэффициент запаса прочности по количеству циклов;  $A, B$  — характеристики материала;  $\sigma_A$  — амплитуда напряжений;  $n_\sigma$  — коэффициент запаса прочности по напряжениям;  $t$  — температура.

Долговечность сварных соединений существенно зависит от таких геометрических параметров, как смещение кромок (рис. 1, а) и радиус сопряжения шва с основным металлом (рис.1, б). Эта зависимость тем больше, чем ниже пластичность (относительное удлинение  $\delta$ ) металла. Полученные расчетные данные удовлетворительно коррелируют с результатами гидравлических испытаний реальных баллонов (светлые значки), в которых значения смещений кромок и радиусов сопряжений определяли после разгерметизации баллонов в местах образования усталостных трещин.

Для устранения дилатации кромок в серийном производстве баллонов разработано сборочно-сварочное оборудование, которое позволяет

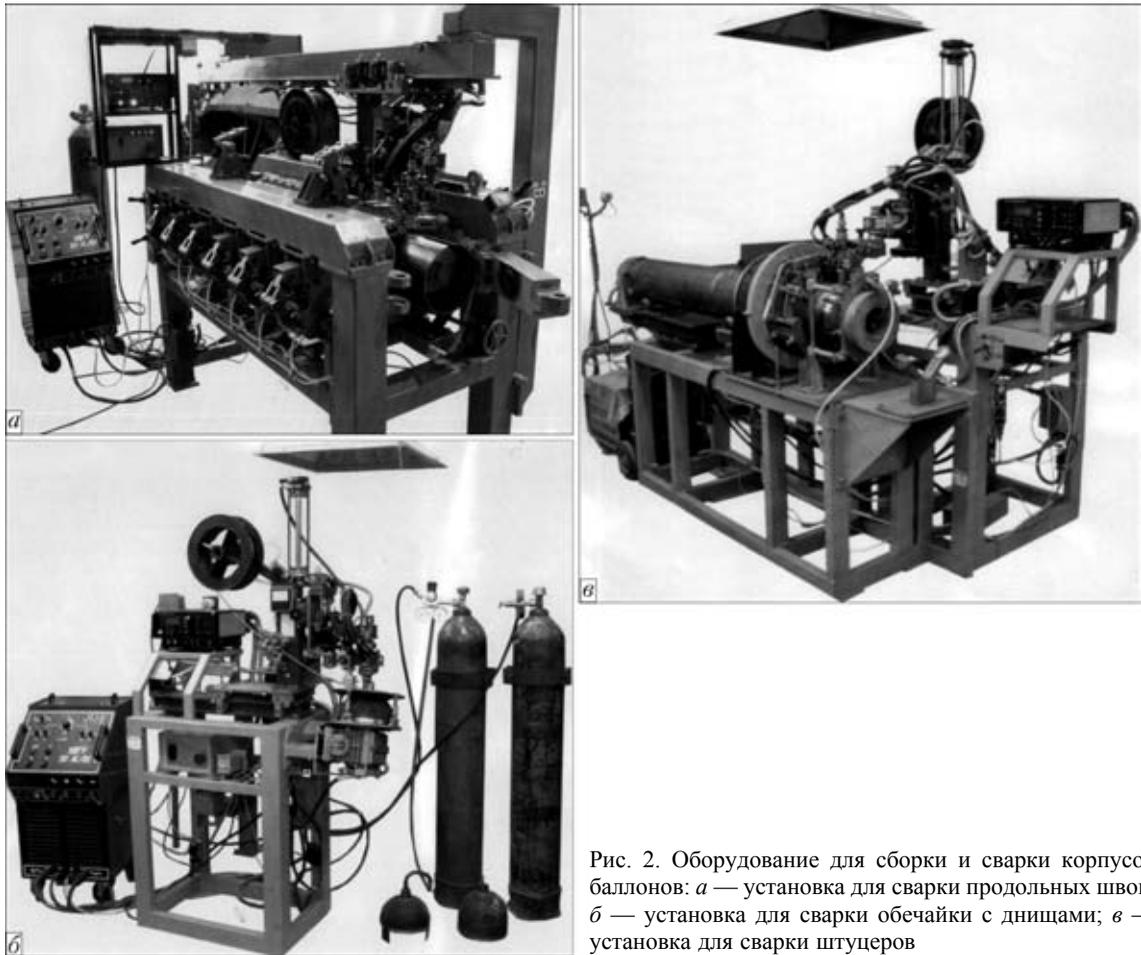


Рис. 2. Оборудование для сборки и сварки корпусов баллонов: *а* — установка для сварки продольных швов; *б* — установка для сварки обечайки с днищами; *в* — установка для сварки штуцеров

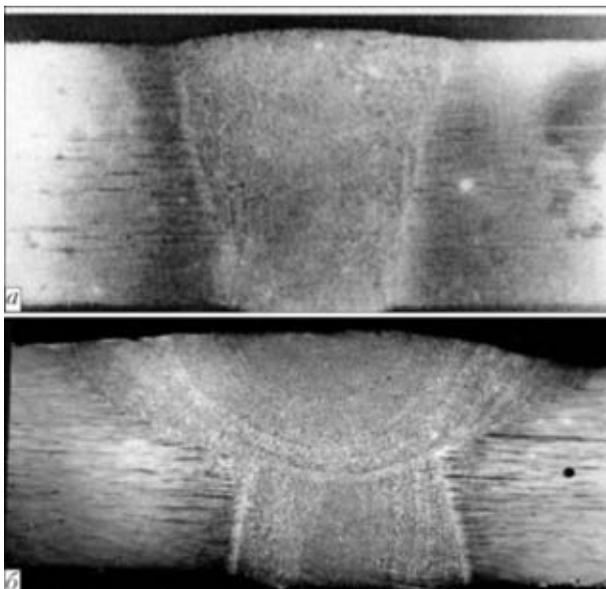


Рис. 3. Макрошлифы одно- (*а*) и двухслойного (*б*) швов

упруго деформировать детали при сборке, устраняя овальность и формируя сварные соединения с минимальным ( $\delta \geq 10\%$ ) смещением кромок (рис. 2). Сварка на данном оборудовании выполняется с одной стороны за один или два прохода (рис. 3, *а*). При первом проходе, который выпол-

няется с полным проплавлением кромок, формируется несущий шов, который соответствует по химическому составу основному металлу. При втором проходе обеспечиваются оптимальная ширина и высота усиления шва и, следовательно, необходимый радиус его сопряжения с основным металлом. С этой целью сварку первого прохода проводят в аргоне с применением специального активирующего флюса, повышающего проплаляющую способность дуги на пониженных токах и позволяющего проплалять за один проход без разделки кромок сталь толщиной до 10 мм. Это позволяет предупредить образование в металле шва и ЗТВ грубых закалочных структур, а также дефектов типа пор, непроваров, несплавлений, трещин и формировать при первом проходе несущие швы I, II класса по ГОСТ 23055–78 с химическим составом, аналогичным основному металлу. Второй проход выполняется с присадочной проволокой и может быть использован для улучшения геометрии, структуры и пластичности металла шва. Соответствие шва требуемому классу качества оценивается 100%-м рентгеновским методом.

Сравнительные испытания, проведенные одной из зарубежных фирм, показали, что соединения микролегированной стали, выполненные по

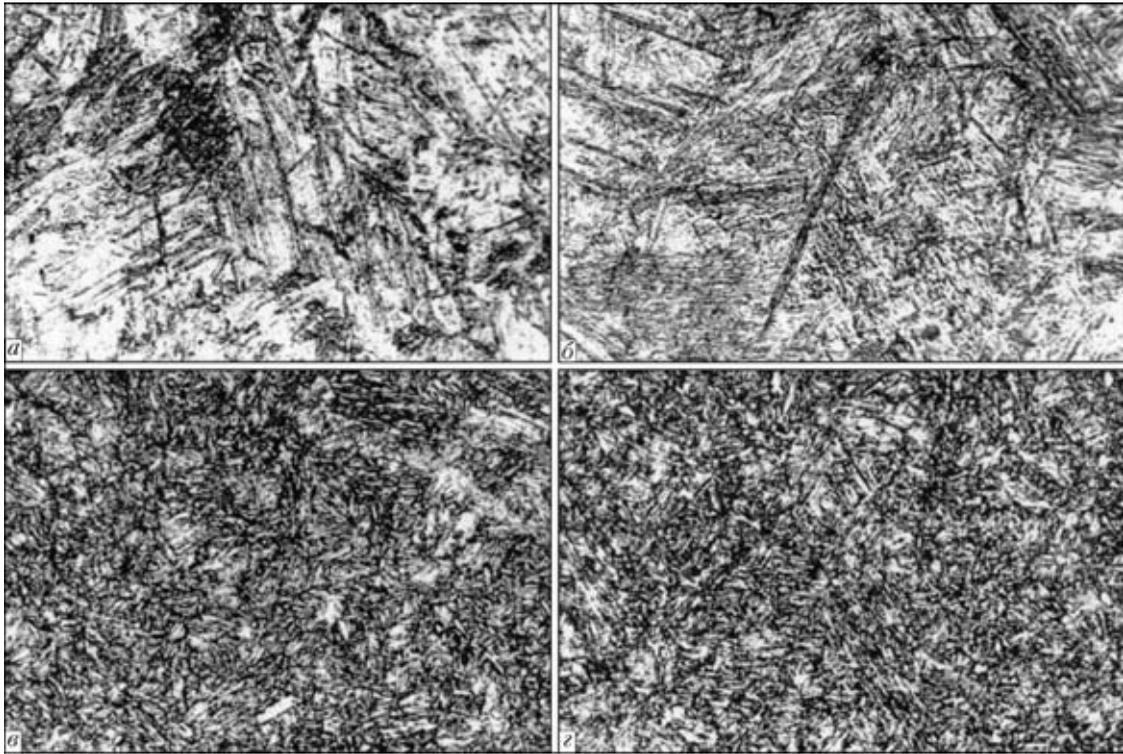


Рис. 4. Микроструктуры (X300) металла шва и ЗТВ после сварки (а, б) и местной термообработки (в, з)

описанной технологии, превосходят соединения, сваренные плазмой, электронным лучом, лазером, плавящимся электродом в смесях газов и неплавящимся электродом в аргоне. Они имеют более высокую сопротивляемость образованию усталостных трещин при малоцикловом нагружении. Что касается среднеуглеродистых сталей, закаливающихся с образованием мартенсита, здесь оказалось, что в ряду факторов, определяющих сопротивляемость усталостному разрушению стыковых соединений высокопрочной стали, важное место занимает исходная структура металла шва и ЗТВ, вернее то, насколько ее можно преобразовать и приблизить к структуре основного металла после финальной обработки. Установлено, что если при послесварочной обработке соединений сталей типа 25СНМВФА или 30ХГСА бейнитно-мартенситную структуру закаленного со сварочного нагрева металла шва и ЗТВ преобразовать в относительно равновесную структуру сорбита отпуска (рис. 4), то после закалки исчезает текстура литого металла шва и измельчается аустенитное зерно в участке перегрева металла ЗТВ. В результате нивелирования различия структур основного металла и соединения увеличивается долговечность баллонов от 1600...1800 до 25000...30000 заправок.

Весьма ответственной операцией в технологической цепочке является неразрушающий контроль сварных соединений. Организация контроля методом рентгеноскопии требует защищенных от излучения рабочих мест, финансовых и временных затрат, что в условиях серийного производ-

ства приводит к образованию узких мест в потоке. Перспективным дополнением к рентгеновскому контролю в серийном производстве баллонов высокого давления является новый метод — сдвиговая спекл-интерферометрия, или широкография [13, 14]. Он позволяет оперативно за несколько минут получать полную информацию о техническом состоянии исследуемого объекта и определять потенциально дефектоопасные места, которые затем выборочно следует контролировать рентгеновским методом.

Основной принцип широкографии заключается в том, что контролируемый участок баллона подвергают нагружению внутренним давлением или внешним нагревом и освещают когерентным лазерным лучом. Отраженный поток света в интерферометре разделяется со сдвигом на два волновых фронта, преобразуется в электрический сигнал и передается для дальнейшей обработки в компьютер. Результаты записываются на электронные носители и могут служить как целеуказание для последующей идентификации дефекта стандартными рентгеновскими методами. Этот метод, очевидно, можно применить и для оценки состояния баллонов при их периодическом пересвидетельствовании. Спекл-картины, записанные при первоначальном контроле, можно сопоставить с картинками, полученными после определенного периода эксплуатации и по ним определять ресурс баллонов.

Как показали исследования [14], при упругодеформированном состоянии объекта можно выявлять не только фиксируемые при рентгеногра-

фировании дефекты, но и локальные концентрации напряжений, обычно отсутствующие на рентгенограммах, но влияющие на долговечность и надежность баллонов.

На основе разработанных конструкций комбинированных баллонов, комплекса технологий и нестандартного оборудования создана технологическая линия сборки, сварки, контроля и термической обработки корпусов баллонов из листового проката (рис. 5, а), а также формирования композиционной оболочки. Линия этого типа позволяет организовать современное производство комбинированных баллонов с прямошовной обечай-

кой производительностью до 24 тыс. в год. Масогабаритный показатель этих баллонов составляет около 0,65 кг/л. Заводская стоимость баллонов в 2 и более раза ниже стоимости аналогичных баллонов зарубежного производства.

К недостаткам прямошовной обечайки обычно относят вероятность расположения вдоль образующей физических и геометрических несовершенств продольного шва, а также несбалансированность жесткости и остаточных напряжений при том, что уровень рабочих напряжений от радиальных усилий в обечайке в 2 раза выше осевых. Для устранения этих недостатков техноло-

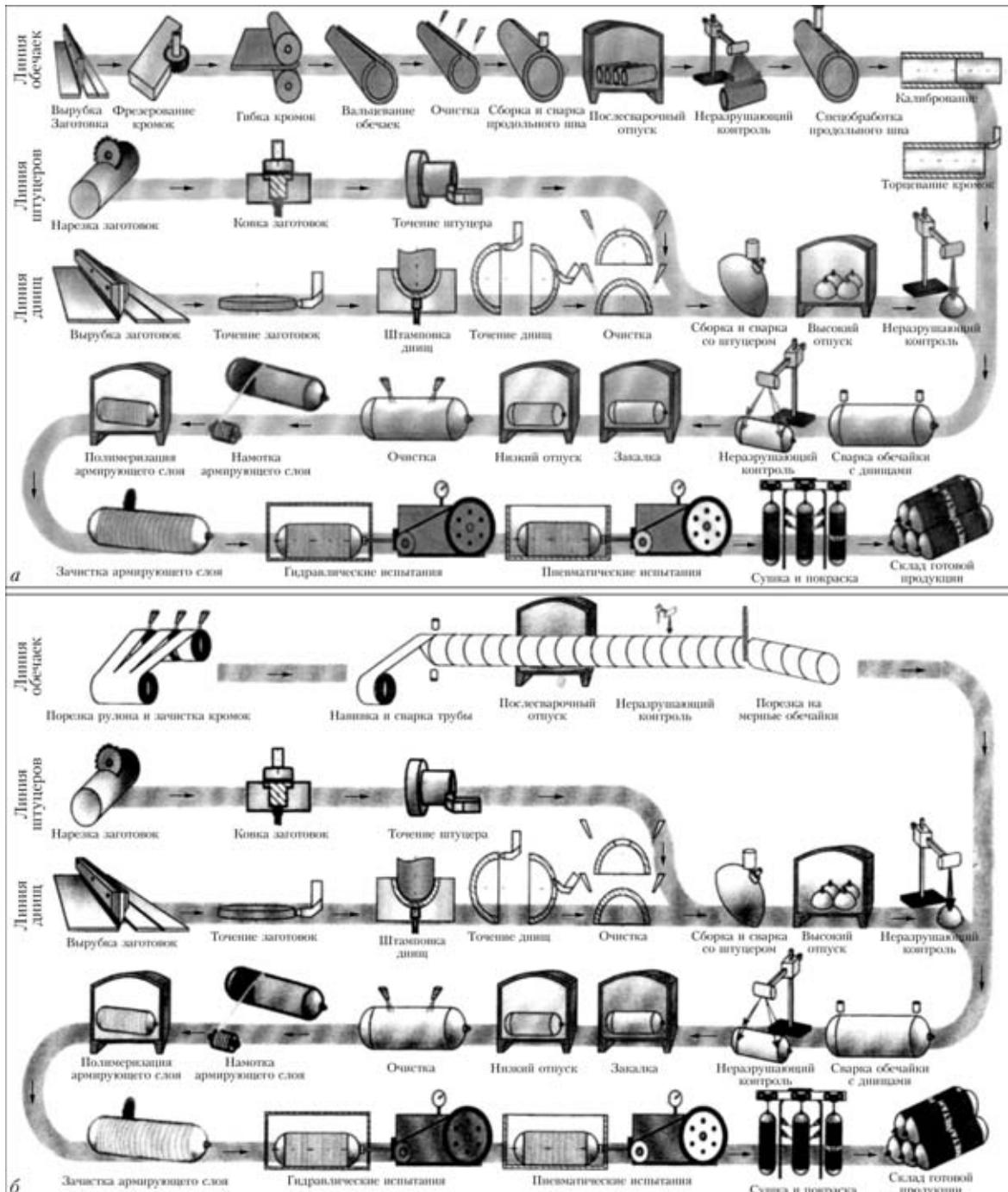


Рис. 5. Технологическая линия изготовления баллонов с прямо- (а) и спиральношовной (б) обечайками

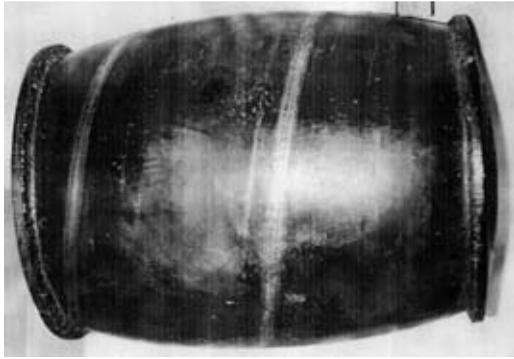


Рис. 6. Внешний вид макета корпуса спиральношовного баллона после испытаний внутренним давлением

гией предусмотрены предварительная гибка кромок, механотермическая обработка соединения и последующее калибрование обечайки. В целом это позволило обеспечить равнопрочность всех участков обечайки и повысить однородность распределения в них рабочих напряжений, но привело к увеличению количества технологических операций.

Спиральношовная обечайка в меньшей степени подвержена влиянию отмеченных факторов, поскольку векторы радиальных напряжений не перпендикулярны к плоскости шва, а зоны повышенной жесткости и упругопластических деформаций не сосредоточены в одной плоскости [15], что исключает необходимые калибрования. Кроме того, совмещение в одном механизме операции формирования и сварки стыка позволяет отказаться от гибки кромок и промежуточной транспортной операции.

С целью дальнейшего сокращения производственного цикла, снижения себестоимости и наращивания производства баллонов предлагается также технологическая линия второго типа (рис. 5, б), отличительной особенностью которой является возможность применения высокопроизводительного способа высокочастотной сварки [16].

Оборудование разработано и прошло испытание при сварке труб специального назначения. Постановка оборудования в линию производства баллонов позволяет объединить в одной установке до пяти технологических операций, в том числе формирование, сварку и горячую обработку трубной заготовки и отменить еще три операции как не востребуемые. В качестве источника нагрева может быть использована также сварочная дуга при некотором снижении скорости изготовления трубной заготовки. Это позволит сбалансировать нагрузку всех элементов линии в условиях мелкосерийного производства или нестабильного спроса на продукцию. В условиях крупносерийного или массового производства целесообразно использовать высокочастотную сварку, основные характеристики которой представлены в таблице.

**Диаметр свариваемых труб в зависимости от толщины и ширины ленты заготовки**

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Ширина ленты, мм
75...100	0,5...1,5 (2,5)*	100
100...200	0,8...2,0 (3,0)	100
200...250	0,8...2,5 (3,5)	200
300...700	1,0...3,0 (4,5)	200, 300, 500 (зависит от типа установки)

\* При мощности генератора тока высокой частоты 250 кВт.

В настоящее время разработаны производственная технология и конструкторская документация на оборудование для сварки спиральношовных труб диаметром от 75 до 700 мм в цеховых условиях. Изготовленные из этих труб и испытанные макеты корпусов баллонов различного назначения дали положительный результат. Внешний вид макета корпуса баллона после испытаний внутренним давлением представлен на рис. 6.

Основные технические характеристики оборудования в режиме высокочастотной сварки следующие:

Скорость сварки, м/мин	30...40
Скорость выхода трубы, м/мин	8...12
Производительность, км труб в смену	1,0...1,5
Мощность генератора тока высокой частоты, кВт	160...250
Мощность электроприводов, кВт	8
Длина труб, м	любая
Напряжение питания электрооборудования (50 Гц), В	380
Свариваемые материалы	сталь, алюминий
Площадь, занимаемая линией сварки, м <sup>2</sup>	150...200

В заключение отметим, что разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона конструкция, технологии сварки и термообработки, а также нестандартное сборочно-сварочное оборудование позволяют изготавливать комбинированные сварные баллоны со стабильным массогабаритным показателем  $M/V = 0,65$  кг/л и долговечностью более 15000 заправок. По ТУ 28.2-05416923-072:2005 изготовлена серия баллонов с запасом прочности (отношением давления разгерметизации  $P_{раз}$  к давлению рабочему  $P_{раб}$ ), равным более 2,6, который сохраняется стабильным после 15 тыс. заправок.

Для организации серийного производства баллонов с прямошовной обечайкой может быть использована технологическая линия первого типа. При необходимости массового выпуска баллонов целесообразно использовать линию второго типа, основанную на изготовлении спиральношовной обечайки.

1. Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України / І. М. Карп, Д. О. Єгер, Ю. О. Зарубін та ін. — Київ: Наук. думка, 2006. — 310 с.



2. Matsuyama K. Trend of automobile vehicles and the joining technologies // Riv. Ital. Saldatura. — 2007. — № 5. — S. 683–693.
3. Волков В., Каплун С. В., Зера А. В. Новый шаг в использовании КПГ в качестве моторного топлива // Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2007. — № 6. — С. 57–58.
4. Соглашение о принципах единообразия технических предписаний для комплексных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях возможного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний // ООН, E/ЕСЕ/ТРАНС/505. Rev.2/Add tog 12 июня 2001. — 42 с.
5. Сахатов Р. М. Безосколочные металлокомпозитные баллоны БМК-300В и другие // Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2009. — № 4. — С. 51–54.
6. Конструкция и технология изготовления металлопластиковых баллонов / В. А. Полевой, В. И. Озеров, А. А. Савиченко, Я. М. Юзькив // Газовая пром-сть. — 1992. — № 11. — С. 30–31.
7. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Кузьменко Г. В. Перспективы применения высокопрочных среднелегированных сталей в сварных баллонах высокого давления для автотранспорта // Автомат. сварка. — 1994. — № 3. — С. 4–9.
8. Пат. 44793 Україна. Балон комбінований / М. М. Савицький, В. М. Кулик, А. П. Лупан, Г. М. Мельничук. — Бюл. № 3. — Оpubл. 15.03.2002.
9. Пат. 82000 Україна. Балон / М. М. Савицький, В. М. Кулик, О. О. Савиченко та ін. — Бюл. № 4. — Оpubл. 25.02.2008.
10. Покровская Н. Г., Петраков А. Ф., Шалькевич А. Б. Современные высокопрочные стали для изделий авиационной техники // Металловедение и терм. обработка металлов. — 2000. — 3, № 2. — С. 23–26.
11. Савицкий М. М. Свариваемость легированных сталей повышенной чистоты // Матер. междунар. семинара по металлургическим требованиям производителей и потребителей к свариваемости стальной продукции. — Киев, 1991. — С. 10–15.
12. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. — М.: Машиностроение, 1976. — 177 с.
13. Электронная ширография — новый метод диагностики материалов и конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // В мире неразруш. контроля. — 2003. — № 4. — С. 67–69.
14. Олійник О. М. Неруйнівний контроль машинобудівних конструкцій методом електронної ширографії: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Ів.-Франківськ: НТУ нафти і газу, 2004. — 16 с.
15. Письменный А. С., Полухин В. В., Полухин Вл. В. Производство спиральношовных труб // Автомат. сварка. — 2005. — № 9. — С. 32–36.
16. Письменный А. С. Высокопрочная сварка металлических изделий / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2008. — 172 с.

The E.O.Paton Electric Welding Institute developed the design and technology for manufacture of high-pressure combined motor transport cylinders with mass-capacity ratio  $M/V \leq 0.65$  kg/l. A cylinder consists of a pressurised body and strengthening composite sheath. Bodies of the cylinders, which are welded from sheet steel, are manufactured by using the specially developed ingenious assembly-welding equipment and technology, subsequent inspection and heat treatment of welded joints. The production lines were built, having an annual capacity of up to 20,000 and 100,000 cylinders and providing their safety factor for strength of more than 2.6.

Поступила в редакцию 19.02.2010

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

### ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

### АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www: paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю

## СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ

**П. И. ЗАЙФФАРТ**, проф. (Инженертехник унд Машиненбау ГмбХ, г. Росток, Германия)

Описан опыт фирмы ИМГ (г. Росток, Германия) по разработке и изготовлению современных автоматизированных линий резки и маркировки профилей для судостроения и родственных отраслей промышленности. Линии обеспечивают высокие точность изготовления деталей и скорость обработки, что позволяет в течение полутора лет окупать затраты на их приобретение.

*Ключевые слова: плазменная резка, судостроение, профили, автоматические линии, оборудование, маркировка, точность изготовления*

Современное судостроение и другие родственные отрасли промышленности требуют высокой степени автоматизации. В известной немецкой фирме Инженертехник унд Машиненбау ГмбХ (ИМГ), г. Росток, Германия используют автоматизированные процессы резки, сварки, сборки и транспортировки. Фирма, помимо автоматизированных линий изготовления плоских и гнутых панелей, оборудована линиями для изготовления микропанелей, автоматизированными линиями резки профилей, кранами и другими транспортными средствами, а также сварочными порталами для получения стыковых и угловых сварочных соединений. С 2005 г. фирма уделяет большое внимание внедрению мощных технологических лазеров. В области применения волоконных итербиевых лазеров в судостроении она занимает ведущее место в мире.

ИМГ выполняет заказы более 50 крупных верфей мира (США, Китая, Кореи, Австралии, Турции, Канады, Франции, Великобритании, Финляндии, Италии и др.). Известна она и в РФ. Здесь ее оборудование работает на Адмиралтейской верфи, Балтийском заводе, северных верфях и др. Первая автоматизированная панельная линия установлена фирмой ИМГ на верфи «Красное Сормово» в Нижнем Новгороде в 2005 г.

Одним из примеров современного оборудования фирмы является поточная линия для автоматической резки профилей. Линия резки профилей (рис. 1) с числовым программным управлением (ЧПУ) предназначена для автоматизированной резки и маркировки профилей, которые применяются в судостроении, и включает следующие составляющие:

оборудование для автоматической подачи материала (столы-накопители для материала с цепными транспортерами; рольганги; устройства автоматической обработки для осуществления плазменной резки роботом концевых резов и внут-

ренних резов (шпигаты) (рис. 2, 3), а также буквенно-цифровой маркировки заготовок (рис. 4).

Оборудование для сортировки профилей после резки включает манипулятор складирования заготовок, сортировочный портал для отгрузки профилей длиной от 3 до 12 м и кассеты для готовых профильных деталей. Работа с поворотной консолью и сортировочным порталом технологичнее и быстрее по сравнению с мостовым краном.

Оборудование для разработки управляющих программ с ЧПУ, обеспечивающее автоматический режим эксплуатации линии резки профилей (рис. 5–7), подразделяется на аппаратную часть (составление программ, хранение файлов и запуск программ) и программную (генерирование программ резки с ЧПУ и эксплуатации линии).



Рис. 1. Общий вид линии резки профилей с ЧПУ

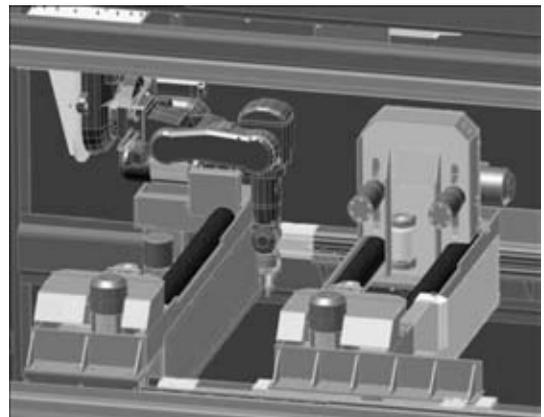


Рис. 2. Внешний вид режущего устройства

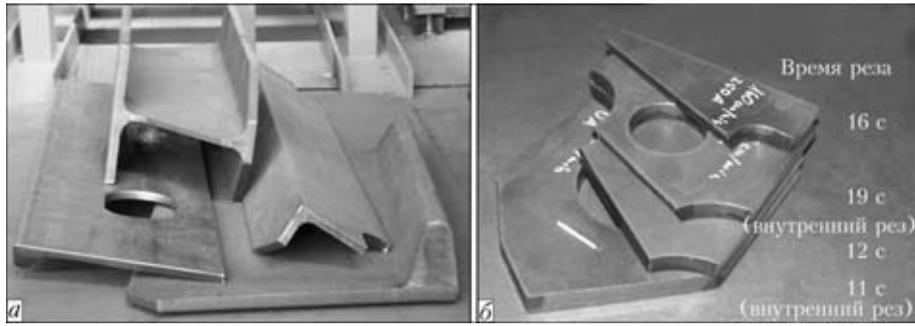


Рис. 3. Концевые резы (а) и внутренние резы различного типа с/или без разделки кромок (б)

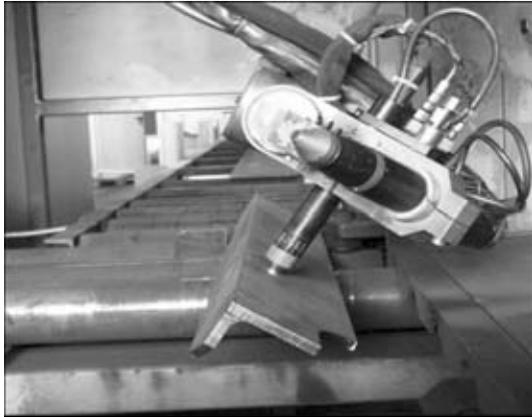


Рис. 4. Маркировка плазменным или струйным способом

Линия резки профилей с ЧПУ представляет собой комплексное оборудование для изготовления деталей из профильного проката. Стыковка с производственными участками на заводе обеспечивается следующим образом. На входе — информация о профилях, поступивших на резку (передается из заводской системы планирования производства); о геометрии резки профилей (поступает из системы автоматизированного проектирования CAD); о профильных заготовках, исполь-



Рис. 5. Ввод и подготовка данных для генерирования программ

зуемых в качестве исходного материала для резки профилей; о пустых кассетах для готовых профилей после резки. На выходе — информация о кассетах, заполненных готовыми профилями для их транспортировки, а также о типах профилей, выполненных резкой (обратная связь с системой планирования производства).

Линия обработки профилей (рис. 8) осуществляет следующие основные функции: раскладку пучков или отдельных профилей на цепном транспортере; промежуточное хранение заготовок на цепном транспортере и передачу на загрузочный рольганг камеры резки; подачу заготовок к камере резки; автоматическое выполнение рабочего задания отдела подготовки производства в камере резки резку по длине (концевые резы); вырезку шпигатов; с помощью маркировочного устройства нанесение краской буквенно-цифровых обозначений); автоматическую транспортировку профилей на разгрузку; сортировку профилей по кассетам с гребнеобразными стойками в заданной технологической последовательности.

Оператор (или два оператора) с помощью имеющегося в цехе крана подает массив профильных заготовок в рабочую зону линии на цепной транспортер. Конструкция транспортера облегчает оператору задачи раскладки и ус-



Рис. 6. Схема программы обработки профилей



Рис. 7. Использование программ резки

положение профиля контролируется устройством измерения длины, находящимся перед камерой резки, при необходимости система измерения выдает сигнал о корректировке позиции с помощью робота резки; выполнение концевых и внутренних вырезов на заготовках с помощью плазменной резки роботом (см. рис. 2 и 3), во время которой профиль остается в камере резки в зафиксированном положении; маркировка профильных заготовок перед камерой резки струйным способом (см. рис 4); смещение профилей на отгрузочный стол примерно на 500...3000 мм. Готовые детали можно сбрасывать или отгружать вручную, а поворотным краном-балкой уложить их в бокс; цеховым краном их можно уложить в бокс или передать на участок шлифования. Отгрузку профилей на расстояние около 3000 и 13000 мм осуществляют с помощью отгрузочного рольганга и цепного конвейера, выполняющего также роль промежуточного накопителя. Возможна отгрузка сортировочным порталом, укладка профилей в кассеты и передача их на участок шлифования. Затем выполняют укладку профилей в кассеты

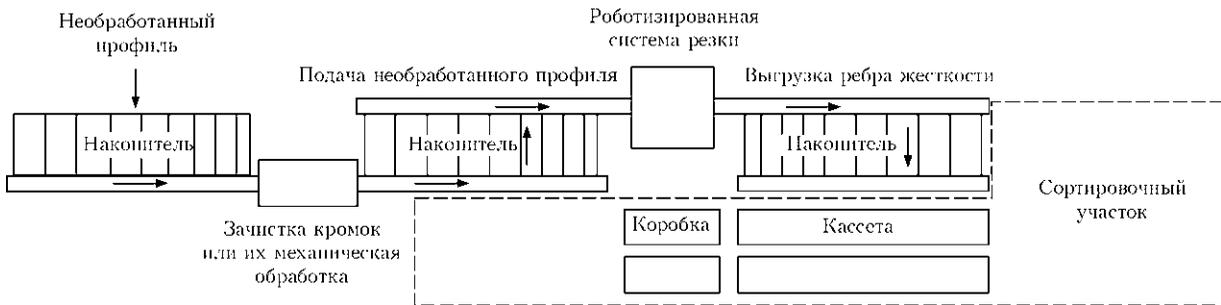


Рис. 8. Схема линии обработки профилей

тановки профилей. При раскладке следует обращать внимание на то, чтобы расстояние между ними составляло 200 мм. После раскладки профилей начинается полностью автоматизированный процесс их обработки: подача отдельных профилей с цепного транспортера на подъемный, а затем к роликовому конвейеру, по которому движется к камере резки; промежуточное накопление профилей на рольганге и последующая их транспортировка к камере резки; подача с помощью рольганга, расположенного перед камерой резки, профиля и его закрепление для обработки. Рас-

цеховым краном и передачу их на участок шлифования, при этом для цехового крана требуется наличие магнитной траверсы.

Таким образом, точность изготовления деталей и скорость обработки во много раз превосходит использованные до сих пор технологии подготовки профилей. Это позволяет исключить узкие места в технологическом процессе. Заметим, что благодаря высокой производительности линии автоматической резки инвестиции на ее внедрение окупаются в течение полутора лет.

The experience of IMG GmbH (Rostock) in development and manufacture of modern automated lines for cutting and marking of sections for ship building and related productions is described. The lines provide high precision of manufacture of parts and processing speed, this allowing payback of their procurement costs within a year and a half.

Поступила в редакцию 14.01.2010



## ОЧИСТКА И АКТИВАЦИЯ СВАРИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ\*

Л. Б. ПЕРВУХИН, д-р техн. наук, О. Л. ПЕРВУХИНА, канд. техн. наук

(Ин-т структур. макрокинетики и пробл. материаловедения РАН, г. Черноголовка, РФ),

С. Ю. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук (Алтайский гос. аграр. ун-т, РФ)

Экспериментально показано отсутствие кумулятивного эффекта при сварке взрывом крупногабаритных образцов и листов промышленных размеров на принятых в промышленном производстве режимах. На основе гипотезы об образовании в сварочном зазоре тонких слоев низкотемпературной плазмы на границе раздела между ударно-сжатым газом и свариваемыми поверхностями предложен механизм очистки и активации поверхностей впереди точки контакта. Формирование прочных связей между атомами соединяемых металлов при сварке взрывом предложено рассматривать как трехстадийный процесс.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, свариваемая поверхность, оксиды и загрязнения, очистка, активация, кумулятивная струя, плазменные потоки, точка контакта, трехстадийный процесс

Для сварки взрывом, как для любого процесса сварки давлением в твердой фазе, наиболее важным является состояние свариваемых материалов, зависимое от механических и химических свойств основного и плакирующего слоев, качества подготовки и шероховатости свариваемых поверхностей.

В соответствии с принятой на сегодня теорией образования соединения при сварке взрывом считается, что в условиях косых соударений происходит самоочистление, как правило, в результате образования кумулятивной струи [1–3], которая снимает слой металла со свариваемых поверхностей вместе с оксидами и загрязнениями и удаляет их из сварочного зазора в виде облака дисперсных частиц. Затем ювенильные поверхности сдавливаются под действием продуктов детонации до образования металлической связи. Процесс соединения металлов при сварке взрывом сопровождается резким повышением температуры в зоне соединения, о чем свидетельствует наличие «литых структур» — зон, в которых происходит плавление материала в процессе сварки. Следует отметить, что непосредственно кумулятивную струю наблюдали только в ходе специальных экспериментов на режимах, заметно отличающихся от применяемых при сварке взрывом сталей. Экспериментально даже по симметричной схеме при малом угле соударения (20° для стали и 30° для алюминия) кумулятивную струю получить не удавалось, а на снимках перед точкой контакта фиксировали наличие облака дисперсных частиц [4].

\* В порядке обсуждения.

При этом граница соединения сформировалась волнистой.

Сомнение в отношении определяющей роли кумуляции в образовании соединения при сварке взрывом отражено в работах [5, 6]. В работе [4] сделан вывод, что «...образование обратного массового потока (кумуляция) не является обязательным условием формирования соединения при сварке взрывом, и, как и волнообразование, имеет к ней косвенное отношение». При этом сварка взрывом рассматривается как сварка давлением в твердой фазе, а схватывание металлов — как частный случай топохимических реакций при сварке давлением, для которых характерна трехстадийность процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов; установление физического контакта; активация контактных поверхностей; объемное развитие взаимодействия. Авторы работы [7] утверждают, что для сварки взрывом присуща двухстадийность процесса образования соединений — физический контакт и активация контактных поверхностей за счет пластической деформации. Однако несмотря на сомнения в существовании обратного потока в условиях сварки взрывом процесс образования и формирования соединений, а также энергетический баланс рассматриваются с учетом наличия кумулятивных эффектов.

В настоящей работе обсуждается вопрос о существовании процесса кумуляции, а при его отсутствии — о наличии механизмов, за счет которых может происходить очистка и активация свариваемых поверхностей.

Для исследования процессов, происходящих впереди точки контакта, применили метод ловушек: на крупногабаритных образцах и листах промышленных размеров (табл. 1) с торца, противоположного началу процесса, установили ловушку, которая состоит из двух предварительно зачищенных листов стали, собранных под углом с



первоначальным зазором, равным сварочному. Указанный метод позволяет на образцах и листах промышленных размеров зафиксировать наличие частиц, вылетающих из сварочного зазора с ударно-сжатом газом (УСГ), при этом условия сварки взрывом не изменяются. Этот метод успешно применен при исследовании процессов, происходящих в сварочном зазоре при сварке титана с титаном [8] и титана со сталью [9].

Перед началом экспериментов по опубликованному экспериментальным и теоретическим данным различных авторов определили ожидаемую толщину покрытия на одной из пластин ловушек при наличии процесса кумуляции (табл. 1). Расчеты произведены из условия, что материал, снимаемый кумулятивным процессом с поверхности свариваемых пластин, осаждается на поверхность ловушки, при этом боковой разлет не учитывается

$$h = \frac{h_{\text{сним}} S_{\text{лист}}}{S_{\text{лов}}}, \quad (1)$$

где  $h_{\text{сним}}$  — толщина металла, снимаемого с поверхности свариваемого листа, мкм;  $S_{\text{лист}}$  — площадь листа, мм<sup>2</sup>;  $S_{\text{лов}}$  — площадь ловушки, мм<sup>2</sup>.

При равенстве ширины свариваемого листа и ловушки отношение примет вид

$$h = \frac{h_{\text{сним}} l_{\text{лист}}}{l_{\text{лов}}}, \quad (2)$$

где  $l_{\text{лист}}$  — длина листа, мм;  $l_{\text{лов}}$  — длина ловушки, мм.

При расчете толщины слоя, который должен осаждаться на пластинах ловушек, за основу были взяты экспериментальные данные работ [4, 10] и одновременно проведена оценка по гидродинамической теории кумуляции [11].

Расчеты ожидаемой толщины покрытия показали, что при сварке взрывом крупногабаритных образцов и листов промышленных размеров толщина покрытия должна составить 48...2600 мкм (табл. 1).

Экспериментальные исследования методом ловушек показали, что при сварке стали с титаном на воздухе на поверхности пластин имеется напыленный слой толщиной 20...80 мкм, состоящий из смеси оплавленных оксидов титана. Од-

нако эксперименты не выявили на поверхности ловушек наличия частиц, вылетающих из сварочного зазора при сварке крупногабаритных листов и образцов из стали со сталью и стали с титаном в аргоне.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показали, что при сварке взрывом стали со сталью и стали с титаном в аргоне на принятых в промышленном производстве биметалла режимах сварки наличие кумулятивного эффекта не зафиксировано.

В процессе сварки взрывом впереди точки контакта в сварочном зазоре образуется область УСГ. Рассмотрим его тепловое воздействие на свариваемые поверхности на расстоянии от начала соударения пластин по методике, изложенной в работе [12]. Тепловой поток из газа на поверхность пластин имеет вид

$$q = \text{St} \rho c_p (T_{\text{УСГ}} - T_0), \quad (3)$$

где  $\text{St}$  — число Стантона;  $\rho$  — плотность газа;  $u$  — массовая скорость газа за фронтом ударной волны;  $c_p$  — теплоемкость газа;  $T_{\text{УСГ}}$  — температура УСГ;  $T_0$  — начальная температура (293 К).

Число Стантона при турбулентном обтекании пластин газовым потоком составляет

$$\text{St}_t = \frac{1}{8(2 \lg \frac{a_p}{k} + 1,74)^2}, \quad (4)$$

где  $a_p$  — расстояние между пластинами (сварочный зазор), мм;  $k$  — средний размер шероховатости поверхности, мм.

При постоянном тепловом потоке из газа в металл поверхность пластин нагревается по закону

$$T_c = \frac{q}{2\lambda} \sqrt{6at} + T_0, \quad (5)$$

где  $\lambda$ ,  $a$  — соответственно теплопроводность и температуропроводность материала свариваемых пластин;  $t$  — время.

Расчеты, выполненные для сварки стали (скорость точки контакта  $v_k = 2500$  м/с;  $a_p = 8$  мм;  $k = 0,08$  мм), показали, что максимальная температура, до которой нагревается поверхность металла при условии бесконечной длины листа ши-

Таблица 1. Толщина слоя покрытия на поверхности одной из пластин ловушек

Свариваемый материал (атмосфера)	Размер образца, мм	Размер ловушки, мм	Расчетные данные, мкм			Экспериментальные данные, мкм
			[9]	[5]	[10]	
Сталь–сталь (воздух)	500×1200	250×500	48	528	192	Отсут.
Сталь–титан (воздух)	500×1200	250×500	48	528	192	20...80
Сталь–сталь (воздух)	1400×5900	250×1400	236	2600	944	Отсут.
Сталь–титан (аргон)	2700×2800	250×2700	112	1232	448	»



Таблица 2. Расчетные параметры плазменной очистки металлопроката

Способ очистки	$T \cdot 10^{-3}, \text{K}$	Плотность энергии, $\text{Вт/м}^2$	Время воздействия плазмы, с	Толщина удаляемого слоя, мкм
Плазменно-дуговой [14]	5...10	$1 \cdot 10^3$	5...10	200...300
Ударной плазмой [12]	5...8	$1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^{10}$ [12, 15]	$2,4 \cdot 10^{-5} \dots 1,12 \cdot 10^{-4}$ (при скорости детонации 2000...2500 м/с)	5...7 [10, 16]

риной в 1 м не превышает 600 °С. Следовательно, воздействие только УСГ на свариваемые поверхности является недостаточным для их очистки и активации.

В связи с этим процессы очистки и активации рассмотрены нами по аналогии с очисткой металлопроката плазмой с использованием следующей гипотезы: в сварочном зазоре впереди точки контакта при сверхзвуковом (5–6 махов) обтекании УСГ свариваемых поверхностей на границе раздела происходит термическая ионизация газа с образованием тонких слоев низкотемпературной «холодной» плазмы [13].

Под воздействием плазменного потока все известные оксиды металлов и другие химические соединения диссоциируют, ионизируются и испаряются (сублимируют) со свариваемой поверхности. Положительные ионы металлов, образовавшиеся в результате диссоциации оксидов и их ионизации, возвращаются на очищенную поверхность, а атомы кислорода образуют простейшие газообразные соединения  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые выносятся из сварочного зазора. Следует заметить, что окалина и ржавчина не являются отходами очистки, таковыми являются именно газифицированные углекислый газ и молекулы воды. Диссоциация оксидов приводит к резкому повышению активации свариваемых поверхностей впереди точки контакта.

Аналогичные процессы имеют место при плазменно-дуговой очистке металлопроката (табл. 2). При плотности энергии  $1 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$  тепловой поток будет составлять  $1 \cdot 10^3 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , а температура достигнет  $(5 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ K}$ , при этом скорость очистки составит 4,5 м/мин [12]. По данным работы [13], тепловой поток из газа в металл при сварке взрывом составляет  $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^9 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{с)}$  при яркостной температуре в сварочном зазоре  $(5 \dots 8) \cdot 10^3 \text{ K}$  в зависимости от режима сварки, а по данным работы [15] — от  $1,3 \dots 1 \cdot 10^9$  до  $4,1 \dots 1 \cdot 10^{10} \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Очевидно, что скорость плазменно-дуговой очистки несоизмеримо меньше, чем при сварке взрывом, но тепловой поток в последнем случае больше в  $1 \cdot 10^6$  раз, а толщина удаляемого слоя составляет всего 5...7 мкм.

В работах [10, 16] путем измерения потери массы установлено, что для режимов, обычно применяемых в промышленном производстве биметалла, с каждой из свариваемых поверхностей уда-

ляется слой толщиной 5...7 мкм. Если рассматривать площадь реальной поверхности по линии, огибающей микронеровности при абразивной зачистке HRz 40, то размер поверхности увеличится в несколько раз. Количественную оценку площади реальной поверхности по линии огибающей микронеровности производили исходя из среднего шага неровности  $S_m$  и высоты ее профиля  $R_z$  согласно ГОСТ 2789–73. Следовательно, при потере слоя толщиной 5...7 мкм с единицы реальной поверхности удаляется слой толщиной не более 0,3...0,5 мкм, что равно толщине пленок на поверхности металла, удаление которых за счет диссоциации обеспечивает очистку и активацию поверхности.

Проведенные исследования и расчеты позволяют предложить следующий механизм образования соединения при сварке взрывом. После достижения УСГ некоторых точек на поверхности, подлежащей сварке, начинается нагрев материала и образование при сверхзвуковом обтекании «холодной» плазмы, под воздействием которой происходит очистка от оксидов и загрязнений и активация поверхности. Исходя из размеров области УСГ время воздействия плазмы составляет примерно  $1 \cdot 10^{-6}$  с. Чистые и активные поверхности вступают в контакт в точке соударения и образуют соединение, формирование которого продолжается за точкой контакта и сопровождается интенсивной пластической деформацией.

Таким образом, для сварки взрывом характерно протекание в указанной последовательности трехстадийного процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов: очистка и активация контактных поверхностей впереди точки контакта в области УСГ под воздействием потока плазмы; образование физического контакта в точке соударения; объемное взаимодействие и формирование соединения за точкой контакта.

Качество сварки взрывом определяется в первую очередь процессами, происходящими впереди точки контакта, — очисткой и активацией соединяемых поверхностей.

На основании выдвинутой гипотезы сделан важный вывод, а именно, для достижения прочного соединения в начале процесса сварки взрывом, исключения образования начальных непроваров и участков с пониженной прочностью необходимо обеспечить требуемые параметры УСГ

и образование слоя плазмы для очистки и активации свариваемых поверхностей.

## Выводы

1. Показано, что при сварке взрывом вследствие воздействия потока плазмы очистка и активация свариваемых поверхностей впереди точки контакта от оксидов и органических загрязнений происходит за счет их диссоциации, сублимации загрязнений и ионизации. При этом положительные ионы металлов, образовавшиеся в результате диссоциации оксидов, частично возвращаются на очищенную поверхность, а атомы кислорода, азота, углерода образуют простейшие газообразные соединения типа  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые выносятся из сварочного зазора УСГ.

2. Предложена следующая последовательность трехстадийного процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов при сварке взрывом: очистка и активация контактных поверхностей УСГ и тонкими плазменными потоками; образование физического контакта в точке соударения; объемное взаимодействие с формированием соединения и пластической деформацией за точкой контакта.

1. *Плакирование* стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина. — М.: Машиностроение, 1978. — 190 с.
2. *Дерибас А. А., Захаренко И. Д.* О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин // Физ. горения и взрыва. — 1975. — 11, № 1. — С. 151–153.
3. *Wittman R. H.* The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welding aluminium alloy // Use of explosive energy in manufacturing metallic materials of new properties: Proc. of 2nd Intern. conf.,

- Marianske Lazne, CSSR, 1973. — Marianske Lazne, 1973. — S. 153–158.
4. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 222 с.
  5. *Otto G.* Aspect relating to the central institute for industrial research // Proc. NATO, Oslo, Norway, 1964. — P. 1435–1441.
  6. *Babul W.* Niektore problemy laczenia wybuchoweg. — Warszawa: IMP, 1968. — 156 S.
  7. *Лысак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
  8. *Влияние* состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О. Л. Первухина, А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, Д. В. Олейников // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгГТУ, 2006. — С. 59–64.
  9. *Особенности* сварки взрывом стали с титаном в защитной атмосфере / О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин, А. А. Бердыченко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 22–26.
  10. *Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.* Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
  11. *Физика* взрыва / А. Ф. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
  12. *Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. А.* Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физ. горения и взрыва. — 1980. — № 6. — С. 69–73.
  13. *Определение* параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при сварке взрывом / С. Ю. Бондаренко, О. Л. Первухина, Д. В. Рихтер, Л. Б. Первухин // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 46–48.
  14. *Сенокосов Е. С., Сенокосов А. Е.* Плазменная электродугвая очистка поверхности металлических изделий // Металлург. — 2005. — № 4. — С. 44–47.
  15. *Использование* методов сварки взрывом и взрывной термической обработки металлов для создания многослойных броневых композиций, имеющих повышенную пулестойкость и живучесть / В. К. Ашаев, Г. С. Доронин, Е. И. Ермолович и др. // Вооружение, автоматизация, управление: Сб. науч. тр. — Ковров, 2006. — С. 317–319.
  16. *Гельман А. С., Первухин Л. Б., Цемахович Б. Д.* Изучение некоторых вопросов очистки поверхностей в процессе сварки взрывом // Физ. горения и взрыва. — 1974. — № 2. — С. 284–288.

The absence of the cumulative effect in explosion welding of large-size samples and commercial-size plates under the conditions used in commercial production is experimentally proved. The mechanism of cleaning and activation of the mating surfaces ahead of the contact point is proposed, based on the hypothesis of formation of thin layers of low-temperature plasma in the welding gap at the interface between the shock-compressed gas and the surfaces. It is suggested that formation of strong bonds between atoms of the joined metals in explosion welding should be regarded as a three-stage process.

Поступила в редакцию 09.12.2009



## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В. А. Лебедев** (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 24 марта 2010 г. докторскую диссертацию на тему «Повышение эффективности сварочного оборудования на основе исследования импульсных воздействий в системе подачи электродной проволоки».

Диссертация посвящена исследованию и разработке нового высокоэффективного механизированного дугового оборудования — полуавтоматов для сварки, наплавки и резки металлов. Выполнен анализ существующих систем и способов повышения эффективности полуавтоматов для сварки и родственных технологий, известных до настоящего времени. Рассмотрен ряд моделей полуавтоматов, которые выпускались и выпускаются в настоящее время. Определены их достоинства и недостатки с учетом цикла: разработка, изготовление, использование. Показано, что одним из наиболее действенных способов улучшения технических характеристик и технологических возможностей является применение в их системах управляемых импульсных режимов работы.

Приведены детальные теоретические исследования и математическое моделирование механизированных дуговых процессов с импульсными изменениями параметров движения электродной проволоки. Исходя из результатов моделирования предложена методика выбора параметров импульсов (частота, форма, ускорение), которые позволяют получить управляемый перенос электродного металла при сварке с короткими замыканиями. Определены условия управляемого переноса электродного металла при импульсной подаче электродной проволоки. Процесс реализован при механизированной сварке стальными и алюминиевыми электродными проволоками в среде защитных газов.

Проанализирована в комплексном виде система подачи проволоки по гибким направляющим каналам с разработкой математической модели, позволившая изучить динамические явления в системе и на этой основе описать переходные процессы при перемещении проволоки по каналу. Установлены закономерности подачи проволоки по гибким направляющим каналам с математическим описанием условий затухания амплитуд и задержек импульсов подачи в канале. Этот цикл

исследований позволяет уточнить параметры импульсной подачи при использовании различных конструкций систем подачи.

Проанализирован ряд систем управления и регулирования в механизированном оборудовании. Уточнено их влияние на качество получаемых сварных швов и валиков наплавленного металла. Предложены новые варианты оптимального управления и регулирования сварочным процессом для механизированного оборудования.

Рассмотрены важные проблемы эффективности использования двигателей электродной проволоки в полуавтоматах различного назначения. Определены оптимальные варианты конструкций роликовых узлов подачи и предложены методики их выбора и расчета. Разработаны новые конструкции роликовых механизмов подачи, в том числе с подающим роликом, неограниченного диаметра. Предложены оптимизированные по показателям надежности и эффективности новые конструкции двигателей проволоки на основе захватов.

Предложены методики выбора и расчета механизмов импульсной подачи на основе квазиволнового преобразователя (КВП), позволяющие получить импульсное движение электродной проволоки с управляемыми параметрами импульсов (частота, форма, ускорение) для реализации импульсных алгоритмов переноса электродного металла при сварке в защитных газах и при использовании порошковых самозащитных проволок (впервые).

Разработаны основы целенаправленного выбора приводного электродвигателя для системы подачи электродной проволоки, в том числе с учетом импульсной составляющей момента. Выполнены разработки простых по конструкции специфичных электроприводов, учитывающих особенности механизированного оборудования для сварки, наплавки и резки.

На основе системного анализа сформулированы эффективные критерии выбора конструкций современного механизированного дугового оборудования для высокоэффективного решения задач по сварке, наплавке и резке сталей и алюминия и его сплавов. Разработаны принципы блочно-модульного конструирования с использованием базовой модели полуавтоматов различного функционального назначения с выбором критериев оценки характеристик надежности.

Выполнены разработки большого количества отдельных важных узлов и систем полуавтоматов: оригинальных механизмов, простых регулируе-



мых электроприводов, систем регулирования механизированных дуговых процессов с созданием методик их расчета и применения в современном оборудовании. Исследованы и технологические возможности новых технических решений. Разработан ряд полуавтоматов для сварки, наплавки и резки с использованием результатов исследования и новых конструкций узлов, в том числе механизированное оборудование для сварки алюминия, резки металлов и ряд других. Рассмотрены разработки полуавтоматов с импульсной подачей сплошной и порошковой электродной проволоки.

Особое внимание уделено разработкам малогабаритных полуавтоматов с источниками сварочного тока, которые питаются от сети однофазного тока 220 В и удовлетворяют высоким требованиям надежности. Предложен ряд технических решений и методика оценки их эффективности.

Рассмотрены новые технико-технологические решения по совершенствованию процессов механизированной сварки и наплавки, которые связаны с использованием нескольких электродных проволок, а также нескольких импульсных воздействий: импульсный механизм подачи и импульсный источник сварочного тока.

Проанализированы экспериментальные исследования эффективности гаммы полуавтоматов блочно-модульной конструкции различного функционального назначения. Результаты работы — внедрение полуавтоматов различного назначения.



**Институт электродинамики  
НАН Украины.**

**С. В. Рымар** (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 27 апреля 2010 г. докторскую диссертацию на тему «Трансформаторы и реакторы устройств подавления высших гармоник тока».

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы развития основ теории и повышения точности расчета электромагнитных элементов устройств подавления высших гармоник тока — трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов путем учета влияния гармонических составляющих тока и магнитного потока в обмотках и магнитопроводах, принципов их разработки и проектирования, что в совокупности вносит существенный вклад в развитие теории электрических машин и аппаратов.

Нелинейные нагрузки, в том числе сварочное оборудование и оборудование родственных процессов, отрицательно влияют на электрическую сеть, генерируя в ней высшие гармоники тока.

Для подавления высших гармоник тока целесообразно применять современные индуктивно-емкостные фильтры высших гармоник тока, а также и трансформаторные и автотрансформаторные фильтры высших гармоник тока и токов нулевой последовательности в виде специальных многообмоточных фазосдвигающих трансформаторов и автотрансформаторов, обеспечивающих повышенные фазности со сдвигом расщепленных фаз на углы, требуемые для компенсации высших гармоник. Существенным преимуществом таких устройств является их высокая надежность, практическое отсутствие генерации в сеть реактивной мощности и высокочастотных помех, невысокая стоимость изготовления и эксплуатации.

Для однозначного нахождения оптимальных значений переменных трансформаторов и реакторов при выбранных критериях оптимизации и существенного уменьшения количества рассматриваемых вариантов при оптимизации разработаны оптимизационные математические модели с полным разделением зависимых и независимых переменных, с возможностью наложения ограничений на выбранные параметры. Созданные на основе разработанной оптимизационной функции, зависящей от одного обобщенного весового коэффициента, методы поиска наилучшего варианта исполнения трансформатора и реактора, которые сводят многокритериальную задачу оптимизации к двухкритериальной, позволяют однозначно находить их наилучший вариант в отличие от существующих субъективных методов поиска использующие принцип начисления баллов и весовых коэффициентов критериям оптимизации. Впервые получены универсальные закономерности изменения критериев оптимизации при изменении значений обобщенного весового коэффициента для всех рассмотренных типов и конструкций трансформаторов и реакторов, которые могут быть использованы при быстрых оценочных расчетах оптимальных вариантов трансформаторов и реакторов при различных критериях оптимизации.

На основе трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния создан новый тип электромагнитного преобразователя энергии в классе устройств подавления высших гармоник тока — силовой трансформатор, сочетающий в одной конструкции трансформатор и индуктивно-емкостной фильтр высших гармоник тока, для которого создан метод расчета его индуктивности рассеяния и исследованы свойства его магнитных потоков.

Усовершенствован метод расчета электромагнитных параметров бифилярных обмоток фазосдвигающих трансформаторных и автотрансформаторных фильтров высших гармоник тока для



случая многослойных обмоток с параллельными проводниками. Повышена точность определения статических и динамических индуктивностей реакторов при изменении нагрузки, что позволило на этапе проектирования определять их электромагнитные характеристики.

С целью повышения точности расчета энергетических параметров трансформаторов усовершенствованы теория и методы расчета добавочных потерь в их обмотках при наличии высших гармоник тока; впервые созданные теория и методы расчета добавочных потерь в обмотках реакторов индуктивно-емкостных фильтров высших гармоник тока дают возможность на этапе их проектирования учесть увеличение основных и добавочных потерь при наличии гармонических составляющих магнитных потоков рассеяния.

В получивших дальнейшее развитие методах расчета потерь в стали магнитопровода и тока холостого хода трансформаторов учтено влияние на энергетические параметры зон в районе стыков стержней и ярем современных конструкций стыковых магнитопроводов трансформаторов, где магнитный поток проходит под разными углами к направлению прокатки электротехнической стали.

Дальнейшее развитие получили теория и методы расчета потерь в магнитопроводе реакторов с учетом высших гармоник магнитного потока в магнитопроводе, что позволило существенно увеличить точность расчета их энергетических параметров. Методы позволяют проектировать качественные реакторы для индуктивно-емкостных фильтров высших гармоник тока.

Разработанные аналитические методы тепловых расчетов трансформаторов и реакторов при наличии охлаждающих каналов в обмотках с учетом движения воздуха при естественном охлаждении и излучении тепла позволяют быстро и с высокой точностью рассчитывать их температурные параметры.

Разработанные теория и методы расчета трансформаторов и реакторов устройств подавления высших гармоник тока позволили создать их новые технологические типы и конструкции, а также с высокой точностью рассчитывать и проектировать трансформаторы и реакторы, что актуально при создании высокоэффективного энергосберегающего оборудования. Это также во многом решает проблему улучшения качества электрических сетей и энергосбережения, уменьшая потери в сетях и оборудовании, в том числе и в сетях со сварочным и спецэлектротехнологическим оборудованием.

Разработанные методы позволяют рассчитывать, проектировать и создавать в Украине современное конкурентоспособное на мировом рынке энергосберегающее оборудование.



**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. С. А. Соловей** (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 19 мая 2010 г. кандидатскую диссертацию на тему «Повышение долговечности тавровых сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями высокочастотной проковкой».

Диссертация посвящена установлению эффективности повышения технологией ВМП циклической долговечности тавровых сварных соединений из низколегированных сталей в исходном состоянии и с накопленными усталостными повреждениями при регулярном, многоступенчатом и блочном нагружениях.

В рамках гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений для тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях установлены предельные значения накопленной усталостной поврежденности при многоступенчатом и блочном нагружениях с возрастающим, убывающим и квазислучайным порядками приложения нагрузок в блоке. Установлено, что в упрочненных соединениях в отличие от неупрочненных вид нагружения и порядок приложения нагрузок в блоке не оказывают существенного влияния на накопление усталостных повреждений. Это вызвано тем, что вследствие обработки ВЧП в зонах концентраторов на поверхности образцов сварных соединений вместо остаточных сварочных напряжений растяжения порядка  $0,9\sigma_T$  материала находятся остаточные напряжения сжатия до  $-0,9\sigma_T$  материала. Предельные значения суммы относительных долговечностей упрочненных сварных соединений находятся в диапазоне от 0,52 до 1,08, а неупрочненных — от 0,32 до 1,97.

Обосновано формулу для суммирования усталостных повреждений в неупрочненных сварных соединениях при многоступенчатом нагружении, учитывающую влияние остаточных сварочных напряжений и коэффициент концентрации напряжений через изменение средних напряжений цикла в зоне концентратора соединения. Учет последовательности приложения нагрузок путем изменения средних напряжений цикла позволяет почти в два раза уменьшить рассеяние предельной суммарной поврежденности, определенной по гипотезе линейного суммирования, с интервала  $[0,32... 1,97]$  до  $[0,32... 1,2]$ .

При регулярном, многоступенчатом и блочном нагружениях исследована эффективность повышения технологией ВМП циклической долговечности тавровых сварных соединений с 50 % уров-



нем накопленных усталостных повреждений. Показано, что степень повышения остаточной долговечности после упрочнения существенно зависит от уровней прикладываемых напряжений до упрочнения. Установленные для данных видов нагружения предельные значения суммарной поврежденности при линейном суммировании усталостных повреждений до и после упрочнения находятся в диапазоне от 0,77 до 3,0. Нарботка 50 % поврежденности до упрочнения на уровнях прикладываемых напряжений, которые приводят к наведению остаточных напряжений сжатия в зонах концентраторов, повышает эффективность применения технологии ВМП: остаточная долговечность соединений увеличивается примерно в 1,2...2,5 раза по сравнению с долговечностью соединений, упрочненных ВМП в исходном после сварки состоянии. После упрочнения сварных соединений с накопленной 50 % поврежденностью до упрочнения на уровнях прикладываемых напряжений, не вызывающих наведение остаточных напряжений сжатия в зонах швов, их остаточная долговечность составляет около 50 % долговечности сварных соединений, упрочненных в исходном состоянии.

Наличие конструктивных непроваров в упрочненных высокочастотной проковкой тавровых сварных соединениях снижает их циклическую долговечность на 10...45 %. Однако упрочнение технологией ВМП сварных соединений с непроварами повышает их циклическую долговечность более чем в 5 раз.

Измерениями микротвердости установлено, что при обработке ВМП глубина пластически деформированного слоя металла достигает 1 мм. Поэтому упрочнение технологией ВМП существенно повышает циклическую долговечность сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами незначительной глубиной (до 1 мм). После упрочнения таких соединений и наработки  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии при исходных уровнях прикладываемых напряжений развития существующих или образования новых трещин не происходит.



**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. С. А. Недосека (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 2 июня 2010 г. докторскую диссертацию на тему «Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии».**

Диссертация посвящена решению проблемы оценки фактического состояния сварных конструкций с накопленными повреждениями и разработке методов акустико-эмиссионной диагностики и мониторинга, имеющих целью заблаговременно на основе прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса выявить опасность возникновения трещин и не допустить разрушения.

Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее эффективных неразрушающих методов контроля состояния конструкций и имеет ряд серьезных преимуществ при его использовании в промышленных условиях. Это стало причиной выбора метода АЭ в качестве предмета научных исследований и разработки на его основе новых методов оценки состояния материалов, выполненных в диссертации.

Для решения задач были объединены современные подходы в таких научных направлениях, как континуальная механика, акустика и математическое моделирование. Результаты исследования АЭ, полученные при механических испытаниях образцов на статическое растяжение, сопоставлены с экспериментальными данными, полученными дополнительными методами: АЭ сканированием, определением ударной вязкости, взвешиванием в жидкости, ЛМ-твердости и металлографическим анализом. Показано, что влияние сварного соединения на АЭ свойства материала состоит в увеличении количества событий АЭ с увеличением объема металла, составляющего зону термического влияния.

На основе комплексного исследования процесса накопления повреждений в материалах в процессе деформирования и эксплуатационной наработки выявлены общие закономерности изменения ряда структурно-чувствительных параметров, в том числе количества событий АЭ, амплитуд и времени нарастания сигналов АЭ до максимума в зависимости от формирования поврежденности, что позволило сформулировать критерии оценки поврежденности и остаточного ресурса материалов по данным АЭ. Показано, что в пластичных материалах существует корреляционная связь между возникновением и ростом пор и акустической эмиссией, что обеспечивает принципиальную возможность применения метода АЭ для оценки и прогнозирования состояния металлических материалов на ранних стадиях накопления повреждений, предшествующих появлению трещин.

Формализован и применен объектный подход к решению задачи, описывающей возникновение, рост и взаимодействие множественных пор в процессе накопления повреждений при деформировании, а также возникновение вследствие этого



волн АЭ. Это позволило существенно упростить, решение задачи за счет инкапсуляции базовой функциональности модели в объектах, моделирующих поры, и обеспечить в рамках того же самого алгоритма моделирования, возникновения и развития разнообразных полей повреждений в разных условиях с учетом влияния концентрации напряжений.

Разработана математическая модель, связывающая АЭ и акустические свойства материала с процессом накопления повреждений, который трактуется как возникновение, рост и взаимодействие сферических пор с учетом влияния объемного распределения повреждений и геометрии концентратора на прохождение через материал акустических сигналов. Модель позволяет создавать эталоны АЭ для различных условий формирования поврежденности в материале. Усовершенствована методика аналитического расчета возникающих и распространяющихся в материале волн АЭ путем разбиения суммарной волны на

элементарные составляющие по волновым числам и комплексным частотам. Выполненные расчеты возникающих и распространяющихся в стержневых и плоских элементах конструкций акустических волн показали зависимость спектра, формы и амплитуд волн от толщины материала. Разработан и подтвержден экспериментально метод прогноза разрушающей нагрузки, основанный на сравнении данных реальных АЭ испытаний с эталонами, получаемыми с помощью математической модели накопления повреждений, представленных в виде вектора состояния материала.

Научные результаты, полученные в работе, подтверждены на практике при анализе состояния действующих конструкций, внедрены и применяются в производственных условиях при диагностическом контроле и непрерывном АЭ мониторинге труб, барабанов котлов, сосудов давления, хранилищ и оборудования цехов производства аммиака, на мостовых переходах труб аммиакопровода.



## ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING and CUTTING», 2009, № 6

### СТИМУЛЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ

Несмотря на экономический кризис, начавшийся с Уолл-стрита и охвативший за несколько месяцев весь мир, тенденция развития экологически чистой энергоиндустрии (финансируемой Всемирным банком, например, в областях солнечной и ветроэнергетики, ядерной и гидроэнергетики) способствует сохранению спроса на сварочное оборудование и материалы, которые составляют не менее 11% на мировом рынке и в настоящее время.

Ежегодный рост инвестиций в эту отрасль ожидается на уровне 6,9% (с 1,9 млрд в 2008 г. — до 3 млрд USD в 2015 г.), причем основные затраты предполагаются не на замену энергетического оборудования, а на его техническое обслуживание и текущий ремонт, для выполнения которого необходимо использование сварочной техники.

Исходя из всеобщего дефицита квалифицированных сварщиков, изготовители сварочных конструкций переходят

к использованию высокоавтоматизированных сварочных процессов с минимальными требованиями к обслуживающему персоналу.

Необходимость повышения производительности сварочных процессов и качества сварных швов, снижения расхода сварочных материалов, использования алюминия взамен стали способствует разработке и внедрению гибридных способов сварки и аппаратуры для изготовления и ремонта сварных узлов.

Таким образом, потребность в изготовлении, техническом обслуживании и текущем ремонте энергетического оборудования, реализуемая известными и новыми способами сварки (дуговая сварка под флюсом, сварка в среде защитных газов и гибридные способы сварки), всегда останется насущной необходимостью даже в условиях глобального кризиса.



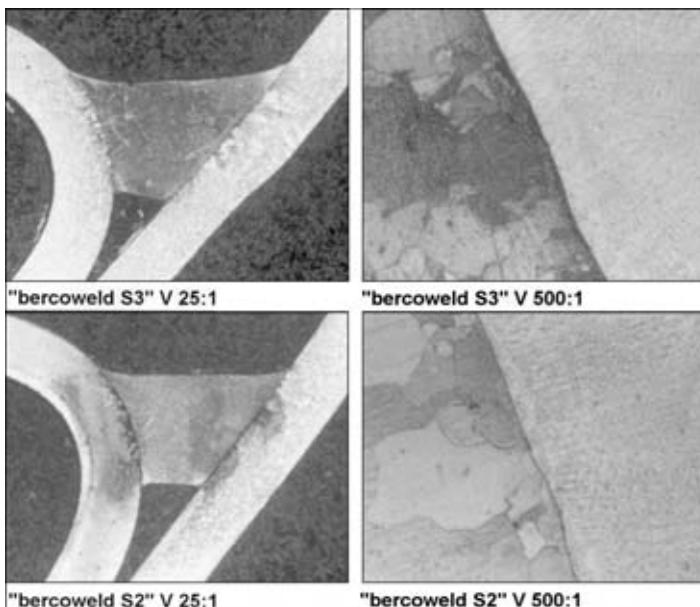
## НОВЫЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И ПАЙКИ

Оцинкованная листовая сталь широко применяется в автомобильной промышленности, и если вначале ее сваривали электродами на основе стальной оцинкованной проволоки, то при переходе на проволоку из медных сплавов оказалось возможным увеличить производительность и снизить себестоимость сварочных процессов за счет сокращения затрат на исправление брака.

Новые электродные проволоки компании «Berkenhoff» (Германия) «bercoweld S2» и «bercoweld S3» для высокотемпературной пайки и сварки стальных оцинкованных листов на основе сплава типа SG-CuSi3Mn обеспечивают получение по сравнению со сварочной проволокой сплава CuSi3Mn более пластичных сварных швов, менее подверженных охрупчиванию за счет строгого ограничения содержания кремния в металле ниже 3 %, что, к тому же, улучшает адгезию фосфатных и лакокрасочных покрытий.

Автомобилестроители в условиях жесткой конкуренции вынуждены постоянно повышать качество внешнего вида автомобильного кузова и при этом постоянно снижать себестоимость его изготовления. В процессах сборки элементов кузова погрешности их изготовления приводят к резкому увеличению сварочного зазора. Поэтому к основным требованиям, предъявляемым к присадочному материалу, добавляется необходимость качественного соединения листов при наличии больших зазоров, повышения скорости сварки, сокращения расхода материалов и времени. Именно с этих позиций была проведена разработка проволоки «bercoweld S3» диаметром от 0,8 до 1,6 мм, пригодная для большинства процессов соединения автомобильных кузовных узлов, включая стандартные МИГ-процессы, лазерную и плазменную пайку.

Возможность получения качественных паяных соединений проволоками «bercoweld S3» и «bercoweld S2» при зазорах, превышающих толщину соединяемых листов, показана на прилагаемых фотографиях.



К достоинствам проволоки «bercoweld S3» относится возможность соединения высокопрочных сталей, которые все чаще стали использоваться в автомобилестроении.

Компания «Berkenhoff» обеспечивает полный цикл изготовления проволоки из цветных металлов, начиная от плавки сырья в собственном литейном цеху, протяжки проволоки в алмазных фильерах, вплоть до упаковки, что обеспечивает высокое качество готовой продукции как по стабильности химического состава, так и по чистоте поверхности проволоки.

Помимо присадочной проволоки из цветных металлов, используемых в процессах сварки и пайки, компания «Berkenhoff» выпускает прецизионную проволоку для электроискровой обработки металлов и других отраслей промышленности, включая электронную и медицинскую.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИФфуЗИОННОГО ВОДОРОДА В СВАРНЫХ ШВАХ

Высокая диффундирующая способность атомов водорода в металлах способствует формированию в нем очагов разрушения. Причем водород проникает в металл не только в процессе его обработки, например, при плавлении, травлении, термической обработке, но и в процессе коррозии. Более того, атомарный водород всегда образуется в изделиях в зонах, подверженных напряжениям растяжения.

В процессах сварки водород проникает в сварные швы из влаги, содержащейся в присадочных и свариваемых материалах, в окружающей атмосфере, и других источниках. Концентрация водорода в зонах нарушения строения кристаллической решетки металла может приводить к рекомбинации атомарного водорода с повышением локального давления вплоть до 1000 атм, что сопровождается возникновением в металле холодных трещин.

Метод горячей экстракции водорода из исследуемых образцов металла по сравнению с ртутным методом позволяет

точнее измерять его содержание и за более короткое время, например, анализатором водорода «G4 Phoenix DH». Этот прибор прост в обслуживании, снабжен автоматической системой проведения измерений, удобной компьютерной программой обработки данных и выдает результат в промилле или в миллилитрах на 100 грамм.

Измерение концентрации водорода в образце происходит при его нагреве инфракрасными лучами до температуры порядка 400 °С в кварцевой трубе диаметром 30 мм. Транспортным агентом выделяемого водорода является аргон высокой чистоты, который затем прокачивается через датчик измерения теплопроводности газа, калиброванный на содержание водорода.

Результаты анализа водорода анализатором «G4 Phoenix DH» и форма выдачи результатов измерения соответствуют международным стандартам AWS A4.3, а также DIN EN ISO 3690.

## НЕКОТОРЫЕ НОВИНКИ НА ЯРМАРКЕ «ЭССЕН — СВАРКА-2009»

В области дуговой сварки плавящимся электродом фирма «Lorch» представила процесс «SpeedArc» и «SpeedPulse», обеспечивающие более глубокое проплавление, стабильное

горение дуги и почти полное отсутствие разбрызгивания. Кроме того, этим процессом можно выполнять вертикальные швы без необходимости выполнения электродом движений



типа «елочки», что позволяет повысить скорость сварки почти на 100%.

Фирма «Fronius» представила усовершенствованный способ сварки «СМТ advanced», учитывающий сочетание полярности сварочного тока и момента включения обратного перемещения сварочной проволоки. Это нововведение позволяет перейти к сварке более тонкого или ультратонкого металла при увеличении сварочного зазора и при изменении его величины.

Фирма «EWM» разработала процесс «ForceArc», обеспечивающий повышенную стабильность направления дугового факела и его осевую концентрацию за счет более высокого давления дуги, более глубокого проплавления металла без подреза сварного шва, с хорошим формированием корневого

шва. При этом появляется возможность вести сварку металла с двусторонней разделкой при одностороннем нагреве металла толщиной 15 мм и более.

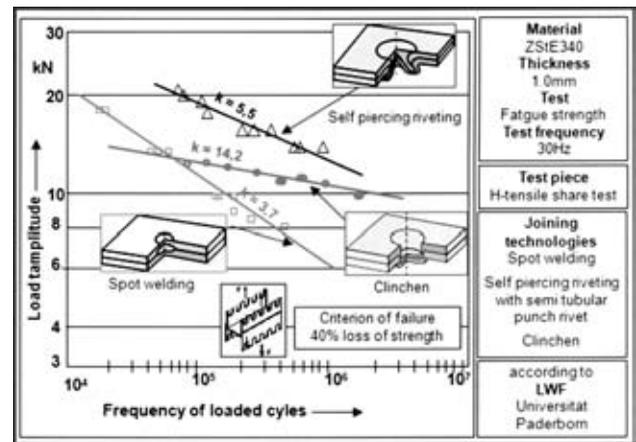
В области газотермической резки металлов представляет интерес бензорез фирмы «Javac», состоящий из бачка для бензина с ручной помпой для подачи бензина в резак давлением воздуха. По второму рукаву в резак подается кислород. К преимуществам бензореза относится возможность разрезания металла большей толщины, за меньшее время и с более чистым резом, чем при использовании ацетилено-кислородной резки, отсутствие обратных ударов пламени, высокая эффективность процесса резки и низкие производственные расходы.

### ПРЕИМУЩЕСТВА МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПО СРАВНЕНИЮ СО СВАРНЫМИ

Механические соединения (типа клепки) используют взамен сварных или паяных, в тех случаях, когда исключается возможность нагрева соединяемых деталей или при необходимости соединения разнородных материалов, например, алюминия со сталью, соединения металлов с пластмассами, композитными и другими материалами.

Преимущества механических соединений материалов способствуют увеличению объема их использования в автомобильной промышленности, при изготовлении мебели и аппаратуры домашнего обихода (холодильники, кондиционеры, кухонные плиты и т. п.), где особенно велики требования к качеству поверхности.

Результаты нескольких проведенных проектов по исследованию прочностных свойств различных типов соединений показывают, что в отношении усталостной прочности соединений механические соединения имеют явные преимущества по сравнению с соединениями, полученными точечной контактной сваркой (см. рисунок).



### ОТСЛЕЖИВАНИЕ СВАРОЧНОГО ЗАЗОРА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

При лазерной сварке для корректировки лазерного луча необходимо использовать контактные или бесконтактные датчики отслеживания сварочного зазора, пригодные для определения его расположения в нахлесточном или угловом типе соединения.

Проблема разработки датчика возникает при сварке листовых материалов с нулевым зазором. Однако такого типа соединения используются все чаще, так как при этом отпадает необходимость в присадочном материале, обеспечивающем получение сварного шва без подрезов или усадки.

Высокочастотные датчики, использующие вихревые токи, применяются в автомобилестроении в процессах дуговой

сварки плавящимся электродом в среде инертного газа, где вполне допустима точность отслеживания сварочного зазора на уровне 0,5 мм, однако для процессов лазерной сварки этот параметр должен быть существенно выше.

В связи с этим в рамках исследовательского проекта были проведены разработка и испытания конструкции дифференциального датчика с Т-образным сердечником с использованием метода наводки вихревого тока в контакте соединяемых деталей с нулевым зазором, которые показали возможность определения местоположения сварочного зазора с точностью 25 мкм относительно его центра.

### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН ОТКАЗОВ, СВЯЗАННЫХ СО СВАРКОЙ И РЕЗКОЙ МЕТАЛЛА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Форсунки мощных газовых турбин подвергаются высоким статическим и динамическим нагрузкам и их надежность в процессе эксплуатации во многом определяется выбором типа сварного шва и материалов, используемых в сварных соединениях.

На основе трех выбранных примеров появления трещин в сварных соединениях показано, что разрушение их в большинстве случаев происходит в результате совокупного воз-

действия нескольких причин. В этом отношении особое значение должно быть уделено рассмотрению причин, вызываемых просчетами конструкции, нарушениями технологии изготовления, сборки и режима эксплуатации.

Анализ поверхностей излома показывает, что основными механизмами металлургического разрушения металла являются усталостное разрушение и горячие трещины.



## 8-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

13–15 апреля 2010 г. в Учебно-исследовательском центре (SLV) г. Галле (Германия) была проведена 8-я Международная конференция и выставка по лучевым технологиям — «STRAHLTECHNIK 2010». Организаторами конференции выступили: Немецкое сварочное общество (DVS), Учебно-исследовательский центр г. Галле (SLV Halle) и Международное объединение сварочных центров (GSI). Спонсорскую поддержку в проведении конференции оказали известные немецкие фирмы-производители сварочного оборудования: «PRO-BEAM», «FOCUS» и «CLOOS».

На конференцию приехало около 100 участников из десяти стран, в частности, Германии, Болгарии, Китая, Финляндии, Великобритании, Австрии, Словакии, Украины и США.

В 2010 г. компания «Schweisstechnische Lehr- und Versuchsanstalt» (SLV) из г. Галле отмечает свой 80-летний юбилей и без сомнения, наиболее успешным и ключевым моментом юбилея стала международная конференция по лучевым технологиям «STRAHLTECHNIK 2010», которая приводится компанией SLV Halle с 1996 г. и за это время превратилась в представительный международный форум по новым разработкам в области лазерных и электронно-лучевых технологий. Это событие происходит каждые три года и объединяет профессионалов со всего мира для обмена информацией и опытом относительно последних современных разработок в области лучевых методов и технологии в промышленном применении. В докладах, представленных в пяти секциях, и стендовых презентациях обсуждались новые идеи, пути развития и результаты в области лазерных и электронно-лучевых технологий сварки и обработки материалов, а также рассматривались факторы оптимального использования этих процессов.

Почетными гостями конференции стали президент Международного института сварки (IIW), проф. У. Дилтай и г-н Дж. Брускоттер, Президент Американского сварочного общества (AWS).

Большинство докладов были посвящены вопросам практического применения лазерной и электронно-лучевой сварки. В 15 докладах освещались особенности применения лазерных и гибридных технологий сварки. Среди них доклады по вопросам орбитальной гибридной сварки труб, применения гибридной сварки в судостроении, лазерной сварки дверей автомобилей BMW, лазерной сварки разнородных металлов и др. Наиболее полное и точное представление о конференции дает перечень пред-

ставленных на ней секционных и стендовых докладов, который приводится ниже.

**Секция 1.** Новые технические решения в области лучевых технологий.

*H.-J. Seilkopf* (г. Бург, Германия). «Электронно-лучевые и лазерные технологии для строительства турбин: опыт и ожидаемые результаты»;

*C. Punshon* (г. Кембридж, Великобритания). «Применение электронно-лучевой сварки в локальном вакууме и новые разработки в области сталей для изготовления крупных морских конструкций».

**Секция 2.** Промышленное применение лучевой сварки I.

*Prof. Dr.-Ing. P. Hoffmann* (г. Эрланген, Германия). «Высокопроизводительные лазерные установки для создания сложных сварных узлов»;

*A. Backhaus* (г. Аахен, Германия). «Электронно-лучевая сварка алюминидов титана с высоким содержанием ниобия»;

*Prof. S. Keitel* (г. Галле, Германия). «Технологии кольцевой лазерной сварки для строительства трубопроводов — в поддержку дуговой сварки металлическим электродом в среде защитного газа МИГ/МАГ».

**Секция 3.** Существующие и будущие базовые разработки в области лучевых процессов и технологий.

*Dr. H. Stauffer* (г. Велс, Австрия). «Повышение скорости сварки и эффективности с использованием гибридного процесса лазерной сварки и сварки последовательными дугами»;

*Dr. O. Marten* (г. Пфунгштадт, Германия). «Оценка пригодности систем фокусировки и формирования изображений для промышленной лазерной обработки с применением высокоэффективных источников пучка мощностью в многокиловаттном диапазоне»;



Секционное заседание



Ознакомление с экспозицией фирмы «CLOOS»



Посещение фирмы «Josch Strahlschweißtechnik GmbH»

*И. Семенов* (г. Киев, Украина). «Моделирование испарения металла и образования плазмы при импульсной лазерной обработке»;

*С. Thomy* (г. Бремен, Германия). «Гибридная лазерная + МИГ/МАГ сварка тонких листов, не чувствительная к зазору в соединении, с использованием одномодового волоконного лазера»;

*И. Tomashchuk* (г. Крезе, Франция). «Численное моделирование лазерной сварки разнородных металлов — меди с нержавеющей сталью».

**Секция 4.** Промышленное применение лучевой сварки II.

*Др. А. Gumenyuk* (г. Берлин, Германия). «Орбитальная сварка при строительстве трубопроводов — новые возможности использования мощных лазеров»;

*А. Scherz* (г. Мюнхен, Германия). «Лазерная сварка алюминиевых дверей при массовом производстве автомобилей нового поколения группы BMW»;

*Проф. Р. Seyffarth* (г. Росток, Германия). «Гибридная лазерная сварка в судостроении с использованием высокоэффективных волоконных лазеров»;

*Др. Р. I. Petrov* (г. София, Болгария). «Параметры электронно-лучевой сварки — сравнительное исследование»;

*С. Paul* (г. Хайгер, Германия). «Применение гибридной лазерной + МИГ/МАГ сварки толстых листов в промышленности».

**Секция 5.** Существующие и будущие базовые разработки в области электронно-лучевых процессов и технологий.

*Проф. Р. Zenker* (г. Фрейберг, Германия). «Электронно-лучевые технологии многоточечной сварки и обработки поверхности с использованием нескольких процессов — современный уровень техники»;

*Xichang Wang* (г. Харбин, Китай). «Применение электронно-лучевой технологии объемной обработки поверхности при соединении композиционных материалов»;

*М. Streiber* (г. Дрезден, Германия). «Электронно-лучевая установка для тепловых и нетепловых процессов»;

*В. Dance* (г. Кембридж, Великобритания). «Определение характеристик электронного пучка: зон-

дирование пучка. Исследование и практический анализ пучка высокой и низкой мощности для управления процессом электронно-лучевой сварки».

**Стендовые доклады**

*В. Dance* (г. Кембридж, Великобритания). «Структурирование поверхности с использованием мощных пучков: обзор последних разработок в области лазерных и электронно-лучевых процессов»;

*Р. Weber* (г. Бусек, Германия). «Системы подачи проволоки для применений с использованием лазерного излучения»;

*F.-H. Rogner* (г. Дрезден, Германия). «Электронно-лучевые источники с холодным катодом: новые возможности использования экономичного сварочного инструмента»;

*М. Mavany* (г. Аахен, Германия). «Повышение эффективности применения гибридной лазерной+МИГ/МАГ сварки с использованием процесса HyDRA-Welding»;

*Т. Waschfeld* (г. Галле, Германия). «Лазерная сварка в автомобильной промышленности — Nissan R35 GT-C»;

*Schwalenberg* (г. Галле, Германия). «Сварка титана с использованием лазерной технологии».

Традиционно параллельно с работой конференции проходила техническая выставка. На ней ряд известных разработчиков и поставщиков лазерного и электронно-лучевого оборудования и демонстрировали свои достижения. Участники конференции ознакомились с экспозициями нескольких компаний, среди которых «Josch Strahlschweißtechnik GmbH» из г. Тайха и «PRO-BEAM» из г. Галле, а также приняли участие в церемонии приема в Государственном музее древнейшей истории с посещением экспозиции Небесного Диска Неба.

Извержение вулкана Эйфьядлайекюдль задержало отъезд участников конференции, но не смогло повлиять на общий положительный императив проведенной конференции.

С трудами конференции (доклады на немецком и английском языках) можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е. О. Патона.

И. Л. Семенов, инж.



## XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «СВАРКА-2010»

С 18 по 21 мая в выставочном комплексе «Ленэкспо» (г. Санкт-Петербург) прошла XIV Международная выставка по сварке и родственным процессам «Сварка-2010», которая имеет более 40-летний опыт и по праву считается одной из самых представительных на постсоветском пространстве. Популярность ее предопределена тем, что Санкт-Петербург — город с огромным научно-промышленным потенциалом, крупнейший центр судостроения, энергомашиностроения, автомобилестроения, транспорта, а также признанный культурный центр.

Сегодня Санкт-Петербург и Северо-Западный регион России являются крупнейшим рынком потребления современной сварочной техники. Поэтому выставка является важнейшим событием, отвечающим задачам дальнейшего развития сварочного производства в России, содействующим модернизации промышленного сектора российской экономики и ускоренному переходу на более высокую ступень технологического развития.

Выставка организована ОАО «Ленэкспо» при содействии Национального комитета по сварке РАН, Национального агентства контроля и сварки, Альянса сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона РФ, известной выставочной компании «Messe Essen GmbH» (Германия) и Общества машиностроителей Китая. Официальную поддержку выставке оказали Правительство Санкт-Петербурга, Союз промышленников и предпринимателей России и Торгово-промышленная палата России. Выставка проходила в суперсовременном павильоне площадью около 9 тыс. м<sup>2</sup>.

Главная направленность выставки — налаживание многочисленных взаимовыгодных контактов с целью успешного внедрения передовых инновационных технологий в производство, расширение объемов автоматизации и роботизации технологи-

ческих процессов; совершенствование подготовки квалифицированных кадров, специалистов и рабочих-сварщиков.

В выставке приняли участие около 200 фирм из Белорусии, Венгрии, Германии, Италии, Китая, России, США, Украины, Финляндии, Чехии, Швейцарии, Швеции. Среди них ведущие российские и мировые производители сварочной техники и материалов, научно-технические организации, малые предприятия, торговые представительства. Многие компании выбирают именно Санкт-Петербург и выставку «Сварка» для проведения своих презентаций и премьерных показов сварочного оборудования и технологических процессов. Среди участников ведущий российский производитель сварочной техники НПФ «Инженерно-технологический сервис» (НПФ ИТС), ЭСАБ (Швеция), «Абикор Бинцель», «Сварочная техника» (Россия), «Линкольн электрик» (Россия), ПГ «Дюкон» (Россия) — официальный дилер фирм «Lorch», «Dalex», «Fimer», Elma Tech, «Translas», «Koike», «Шторм» (Россия), представительства в России и странах СНГ компаний EWM (Германия) и «Bluweld» (Италия), «Thermal Dynamics» (США), «Polysoude» (Франция), «АРГУС Пайплайн Сервис» (Россия), «Крон СПб» — представитель «Oerlicon», «Air Liquide Welding», FRO, SAF в России и «Мир сварки» — представитель компании «Sol Welding» (Италия) и др. Как уже отмечалось, партнерами ОАО «ЛенЭКСПО» по организации выставки стали Messe Essen и Общество машиностроителей Китая. На выставке был организован международный павильон «Essen Welding pavilion», включающий экспозиции 12 фирм из Германии, Венгрии, Италии и США, в том числе одного из лидеров мирового рынка сварочной техники — «Карл Клоос Швайстехник ГмбХ», которая специализируется на производ-





стве робототехнологических комплексов для сварки и резки, разработке новых высокопроизводительных процессов и оборудования, например, для гибридной лазерно-дуговой сварки.

Большой интерес у посетителей выставки вызвала экспозиция фирмы «МТБ» (США), являющейся мировым лидером в производстве машин для сварки трением. Оборудование фирмы обеспечивает все ныне существующие типы сварки трением: инерционную, с непрерывным приводом, линейную и ротационную. Они с успехом используются в сельхозмашиностроении, самолетостроении, авиакосмическом двигателестроении, автомобилестроении, нефтегазовой промышленности, оборонной отрасли, при выполнении биметаллических соединений.

На национальном стенде КНР разработчики продемонстрировали 19 компаний, в том числе 8 компаний из провинции Тяньцзинь, которые представили передовые сварочные технологии, оборудование и материалы.

Следует отметить масштабные успехи производителей сварочных материалов из Китая. Так, предприятие «Тяньцзинский мост» (основано в 1957 г.) является одним из 40 крупнейших предприятий в одноименной провинции и одним из крупнейших производителей сварочных материалов в Китае с годовым объемом продаж 600 тыс. т. Номенклатура включает 350 видов сварочных материалов, выпускаемых под маркой «Мост».

Фирма «Tianjin Sainteagle Welding» выпускает широкую гамму электродов рутилового типа для мало- и среднеуглеродистых сталей, электроды с пониженным содержанием диффузионного водорода, в наплавленном металле, электроды для сварки низкотемпературных и теплоустойчивых сталей. Кроме того, газозащитные электродные материалы

для сварки неплавящимся электродом без дополнительной защиты аргоном.

Украина на выставке была представлена Краматорским заводом автогенного оборудования «ДОН-МЕТ», Одесским предприятием ОАО «Зонт» (филиал в России — ООО «Автогенмаш», г. Тверь), Каховским заводом электросварочного оборудования (представительство в России — ЗАО «Каховка», г. Белгород), Симферопольским моторным заводом, Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Ильницким заводом МСО и заводом Артем-Контакт.

У стенда ИЭС им. Е. О. Патона царило особое оживление. Многие интересовались современными разработками института, конкретными местами их внедрения, инновационными проектами последних лет. Положительная оценка высказывалась в адрес печатного органа ИЭС им. Е. О. Патона — журнала «Автоматическая сварка» благодаря возможности получать из него разнообразную информацию по актуальным проблемам сварочного производства, ознакомления с новинками, а также рефератами ведущих профильных журналов мира.

Во время проведения выставки 19–20 мая состоялась Международная научно-техническая конференция «Передовые технологии и развитие сварочной науки и практики». В ней с интересом были заслушаны доклады Н. П. Алешина (Россия) «Оценка остаточного ресурса сварных конструкций»,



К. Миддельдорфа (Германия) «Передовые сварочные технологии и родственные процессы», А. И. Чупрака «Разработка и применение стандартов в области сварочного производства», З. А. Сидлина (Россия) «Российские сварочные электроды в период общего спада» и др.

Работа в презентационной зоне выставки проходила по специальной программе. Она включала презентации фирм ЭСАБ по теме «Решение ЭСАБ по сварке и резке для повышения эффективности в судостроении», демонстрацию российских новинок — роботы АВТОВАЗа, мастер-классы по современному обучению сварщиков на адаптированных тренажерах (Невский политехнический лицей), российско-германского сотрудничества в среде инноваций в сварочном производстве — применения тренажеров в учебных центрах Германии и России, энергосберегающие технологии и защита окружающей среды в сварочном производстве, новые сварочные материалы, вопросы разработки и внедрения технологий и оборудования, искусство в сварке.

Интересным почином организаторов выставки было проведение молодежного форума сварщиков —

встречи молодых специалистов-сварщиков из технических вузов и учебных заведений среднего профессионального образования, выпускников средней школы с ведущими специалистами сварочной отрасли. В рамках форума, ставившим своей целью познакомить молодежь со спектром современного сварочного оборудования, помочь составить представление о новых технологиях соединения, был показ фильма «Сварка. Области применения процесса»; заслушаны доклады о применении сварки под водой, в космосе, в медицине; выступления ведущих кафедр сварки вузов Санкт-Петербурга; проведено награждение победителей городского конкурса сварщиков; концертная программа.

Подводя итог, следует отметить, что выставка оставила благоприятные впечатления. Она стала реальным инструментом развития и совершенствования промышленного производства, позволила обменяться обширной информацией, укрепить научное и деловое сотрудничество, установить новые контакты, а также дала импульс творческим поискам.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

УДК 621.791.001.12/18



## ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ»

25–28 мая 2010 г. в пос. Кацивели (Крым, Украина) состоялась Пятая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (MMITWRP-2010) на базе Дома творчества ученых НАН Украины «Кацивели».

Организаторами конференции выступили Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Местный благотворительный фонд «Содружество сварщиков».

В работе конференции приняло участие более 60 специалистов из Украины, России, Германии и Австрии. Конференция организована в виде пленарных





и стендовых сессий, рабочими языками конференции были русский и английский (обеспечен синхронный перевод докладов).

Во время работы пленарной сессии было заслушано 32 доклада. Открыл конференцию академик НАНУ В. И. Махненко с обзорным докладом «Перспективы развития математического моделирования и информационных технологий в сварке и родственных процессах» (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина), в котором рассмотрены результаты математического моделирования применительно к таким сварочным проблемам, как кристаллизация жидкой ванны; теория двухфазной зоны; стабильность микроструктуры первичной кристаллизации; локализация критериев свариваемости современных сталей и сплавов; развитие критических технологий в сварке и родственных процессах; прогнозирование ресурса безопасной эксплуатации сварных узлов.

В докладе обсуждены современные средства математического моделирования и возможности стандартных коммерческих пакетов.

В устных и пленарных докладах исследованы математические модели и вычислительные алгоритмы процессов тепло-, массо- и электропереноса, протекающие при сварке и в процессах специальной электрометаллургии. Рассмотрены также проблемы

моделирования процесса формирования капли электродного металла; численного исследования воздействия импульсного лазерно-дугового источника тепла на металл и другие вопросы.

Тезисы докладов вместе с программой работы конференции были опубликованы к началу конференции. Сборник трудов конференции будет издан до конца 2010 г. Указанный сборник, а также сборники трудов Первой–четвертой международных конференций можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

Программный и Организационный комитеты конференции выражают признательность академикам НАН Украины И. К. Походне и В. И. Махненко за постоянное внимание к конференции и поддержку молодых ученых, подготовивших около половины всех докладов представленных на конференции.

Конференция проходила в творческой и дружеской атмосфере и завершилась поездкой участников конференции на вершину Ай-Петри с заездом на водопад Учан-Су и прогулкой по набережной в г. Ялте.

Следующая, Шестая международная конференция, состоится в последней декаде мая 2012 г.

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

УДК 621.791.001.12/.18

## СЕССИЯ НАУЧНОГО СОВЕТА ПО НОВЫМ МАТЕРИАЛАМ ПРИ КОМИТЕТЕ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ АКАДЕМИЙ НАУК

26–27 мая 2010 г. в Киеве в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины состоялась 15 сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук (МАН). Тематика сессии «Новые процессы получения и обработки металлических материалов».

В заседании Научного совета приняли участие более 100 ученых и специалистов в области материаловедения от академий наук, вузов и предприятий Беларуси, Казахстана, России и Украины.

26 мая, в первый день работы Научного совета, проходили заседания секций совета по материалам на основе меди и полимерным материалам, а 27 мая состоялось пленарное заседание. Это позволило обсудить на пленарном заседании некоторые предложения и замечания по дальнейшей деятельности Научного совета, высказанные в ходе работы секций.

Открыл пленарное заседание Научного совета его председатель, президент МАН, президент НАН Украины, директор ИЭС им. Е. О. Патона академик Б. Е. Патон. Он сказал, что пленарное заседание 2010 г. посвящается достаточно широкому кругу проблем в

области материаловедения. На пленарное заседание был представлен 21 доклад, из них было отобрано 12 наиболее интересных. Большое количество докладов свидетельствует о том, что интерес к Научному совету по новым материалам возрастает.

Академик Б. Е. Патон ознакомил участников сессии с программой и регламентом работы пленарного заседания, на котором были заслушаны доклады ученых из Беларуси, Казахстана, Российской Федерации и Украины.

Академик РАН Е. Н. Каблов (Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов — ВИАМ, Москва, РФ) выступил с докладом «Перспективные технологии производства изделий из жаропрочных сплавов нового поколения». Он отметил, что в авиационной промышленности в настоящее время широко используется пайка. В авиации для пайки различных изделий в авиации применяется около 50 марок припоев на основе олова, свинца, меди, серебра, никеля и титана. Часть из этих припоев может быть изготовлена только в виде порошков. В ВИАМе введена в про-



изводство установка, позволяющая выпускать высококачественные порошковые припои в промышленных масштабах. Сотрудниками института разработаны принципиально новые технологии термомеханической обработки труднодеформируемых гетерофазных сплавов, обеспечивающие формирование регламентированных структур с повышенной пластичностью при оптимальных температурно-скоростных параметрах деформации. Разработаны также способы получения отливок с направленной и нанокристаллической структурами.

Новым технологиям изготовления микро- и наноразмерных порошков неорганических материалов был посвящен доклад «Электронно-лучевая технология получения микро- и наноразмерных порошков неорганических материалов» академика НАН Украины Б. А. Мовчана (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев). В Международном центре электронно-лучевых технологий ИЭС им. Е. О. Патона создана электронно-лучевая установка для производства твердо- и жидкофазных субстанций с наночастицами неорганических материалов. Разработанная технология позволяет управлять составом, формой, размером и структурой наночастиц неорганических материалов в основном различных оксидов.

Академик РАН В. Е. Панин (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия) посвятил свой доклад «Актуальные проблемы наноструктурирования поверхностных слоев конструкционных материалов и их сварных соединений» исследованию влияния наноструктурирования поверхностных слоев на прочностные и эксплуатационные свойства материалов. В результате нанесения наноструктурных покрытий возрастает не только прочность, но и пластичность стали, увеличивается усталостная прочность при циклических испытаниях на знакопеременный изгиб, отмечено также увеличение износостойкости и термической стойкости обработанных материалов.

О преимуществах и недостатках, а также о перспективах развития акустических методов неразрушающего контроля рассказал академик РАН Н. П. Алешин (ФГУ Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ).

Задачам, которые необходимо решать ученым при переходе от материалов с микрокристаллической структурой к материалам с нанокристаллической структурой, а также свойствам материалов с такой структурой, был посвящен доклад «Научные основы получения нанометаллических материалов» академика НАН Украины С. А. Фирстова (Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев). Если раньше прирост прочностных свойств конструкционных материалов в основном шел за счет разработки сплавов с новым химическим и фазовым

составом, то в последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования в них нанокристаллической структуры.

«Создание высокопрочных титановых сплавов для морской техники» — тема доклада сотрудников ЦНИИКМ «Прометей» (Санкт-Петербург, РФ), который прочитал канд. техн. наук Б. Г. Ушаков. Сплавы, предназначенные для изготовления конструкций, которые эксплуатируются в морской воде, должны обладать высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью и высокими механическими свойствами, в частности, пластичностью при обработке давлением. В результате выполнения большого объема исследований такие сплавы были разработаны. Новые материалы на основе сплава типа 5В обладают повышенным уровнем прочностных характеристик, оптимальным сочетанием характеристик работоспособности (вязкость разрушения, сопротивление упругопластическим деформациям, сопротивление ползучести).

О применении электромагнитных воздействий и оригинальной МГД-техники в новых процессах получения металлоизделий из цветных металлов, стали и чугуна рассказал чл.-кор. НАН Украины В. И. Дубоделов (Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев).

В докладе сотрудников Института металлофизики НАН Украины (Киев), прочитанным д-ром техн. наук В. Ф. Мазанко, рассмотрено явление аномального переноса при внешних воздействиях на металлы и способы его практического использования. По мнению авторов, это явление можно использовать для импульсных методов сварки давлением; механико-химико-термической обработки; модифицирования поверхностных слоев металла; восстановления изношенных поверхностей; создания покрытий с различными свойствами: коррозионно- и износостойкими, антиэмиссионными, декоративными, с аморфным и наноструктурированным состоянием.

Участники сессии имели возможность в ходе дискуссий обменяться мнениями о прочитанных докладах, о состоянии работ в области разработки новых материалов в своих странах, оценить работу Научного совета по новым материалам, высказать пожелания по ее улучшению. Проводимые ежегодно сессии Научного совета по новым материалам МААН позволяют сохранять и развивать творческие связи между учеными различных стран, способствуют интенсификации информационного обмена между ними.

Следующую сессию Научного совета по новым материалам МААН запланировано провести в мае 2011 г. в ИЭС им. Е. О. Патона.

И. А. Рябцев, канд. техн. наук

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ФОРУМ «ПАТОН ЭКСПО 2010»

1–3 июня 2010 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» прошел традиционный специализированный промышленный форум «ПАТОН ЭКСПО 2010», включавший выставки «Сварка. Родственные технологии», «Трубопроводный транспорт», «Неразрушающий контроль», организатором которых выступили НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» НАН Украины и «Ассоциация «ОКО» при поддержке НАН Украины, НАК «Нафтогаз Украины», ГК «Укртрансгаз», Ассоциация промышленного арматуростроения Украины, Общество сварщиков Украины. Устроителем форума выступил ООО «Центр трансфера технологий «ИЭС им. Е. О. Патона».

В церемонии открытия выставки приняли участие президент НАН Украины, генеральный директор НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» Б. Е. Патон, директор НИИ МСМА О. Т. Драганчук, Президент Киевской торгово-промышленной палаты Н. В. Засульский, а также представители торговых палат ряда зарубежных стран, исполни-



вестных производителей сварочного оборудования и материалов «Фрониус-Украина», завода автогенного оборудования «ДОНМЕТ», «Зонт», «Фрониус электрод», «Бинцель Украина», «Запорожстеклофлюс» и др.

В выставке «Неразрушающий контроль» приняли участие «Ассоциация «ОКО», объединяющая ведущих отечественных разработчиков и производителей средств неразрушающего

контроля (УкрНИИНК, НПФ «УльтраконСервис» и НПФ «Промприлад»), и «ОНИКО», являющегося официальным представителем компаний «GE Inspection Technologies», «Magnaflux», «AGFA», «SONY» в Украине.

Достижения итальянских предприятий были представлены на стенде «Mira Italy» (производство оборудования для дуговой сварки и термической резки, нержавеющей и алюминиевой сварочных проволок и прутков, а также порошковых проволок).

В рамках форума состоялась научно-техническая конференция «Комплексный подход в решении проблем неразрушающего контроля магистральных трубопроводов, трубопроводная арматура: технология диагностики, сварки, наплавки, ремонта».

В заключение следует отметить, что ежегодная выставка «Сварка. Родственные технологии» традиционно является основной профильной выставкой в Украине. За три дня ее посетители могли познакомиться с современными разработками и спектром производимого специализированного оборудования и материалов.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук,  
А. Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук



тельный директор Ассоциации промышленного арматуростроения Украины Н. А. Андрощук, президент Общества сварщиков Украины В. Г. Фартушный, главный инженер ГК «Укртрансгаз» М. В. Беккер, чрезвычайные и Полномочные послы Италии и Индии в Украине.

В трех выставках были представлены экспозиции около 50 компаний из Украины, России, Ирана, Австрии, Италии и Польши. Среди экспонентов выставки «Сварка. Родственные технологии» стенды ИЭС им. Е. О. Патона, ОКТБ института, двух опытных заводов (ОЗСО и ОЗСМ), НТЦ «Сепроз», из-



## ПАМЯТИ проф. П. ЗАЙФФАРТА



27 мая 2010 г. на 71-м году ушел из жизни всемирно известный немецкий ученый в области сварки профессор Петер Зайффарт.

Получив образование в Ростокском университете и пройдя стажировку в Ленинградском кораблестроительном институте, П. Зайффарт, благодаря

своим незаурядным способностям и активности, был оставлен работать в университете г. Росток (ГДР), где очень скоро получил научное признание за исследования в области микроструктурных превращений при сварке сталей. Это направление, связанное с проблемами свариваемости низколегированных сталей повышенной и высокой прочности, стало одним из главных направлений его научной деятельности.

Выпущенный под его руководством в середине 1970-х годов большой атлас микроструктурных изменений в сталях при сварочном нагреве стал настольной книгой для многих сварочных лабораторий и исследователей во всем мире.

Большой интерес вызвали работы проф. П. Зайффарта, проводимые совместно с сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона по математическому моделированию микроструктурных превращений при сварке. В 1970–1980-х годах П. Зайффарт увлекается вопросами математического моделирования при сварке, становится активным участником многих международных мероприятий (конференций, летних школ и т. д.) по этому новому в то время направлению.

После объединения Германии П. Зайффарт становится руководителем вновь организованного Сварочного учебного и исследовательского центра земли Мекленбург-Форпоммерн (SLV M-V GmbH). С присущей ему энергией занимается организацией отделения, строительством корпуса, оснащением лабораторий, подбором специалистов и т. п., интересуется использованием лазерной сварки для судостроения, создает соответствующую лабораторию, добывает средства для оснащения лаборатории современной лазерной техникой, выступает с докладами на различных мировых форумах по данной тематике.

В 2004 г. ему исполняется 65 лет и он в соответствии с действующими в ФРГ законами, переходит на работу в коммерческую фирму *Ingenieurtechnik und Maschinenbau GmbH* на должность руководителя отдела исследований и развития, где с присущей ему энергией занимается применением новой техники для проектируемых фирмой судостроительных верфей в различных регионах мира. Естественно, много внимания уделяет применению лазерной и гибридной сварки.

П. Зайффарт был большим другом ИЭС им. Е. О. Патона. С директором института академиком Б. Е. Патонам его связывали очень теплые отношения. В тяжелые времена «перестройки» проф. П. Зайффарт содействовал получению институтом европейских заказов.

Светлая память о Петере Зайффарте навсегда сохранится в сердцах тех, кто работал и общался с ним.

## ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США

\*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

**Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.**

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

### ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала \_\_\_\_\_

Срок подписки с \_\_\_\_\_ **200 г. по** \_\_\_\_\_ **200 г. включительно**

Ф. И. О. \_\_\_\_\_

Компания \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел., факс, E-mail \_\_\_\_\_



## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

### Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

### Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$

Полноцветная (200×290мм) — 340\$

Полноцветная (200×142мм) — 170\$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (165×245мм) — 300\$

Полноцветная (165×120мм) — 170\$

Полноцветная (82×120мм) — 80\$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

- Статья на правах рекламы (страница А4, 170×240мм) — 170\$

- При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

### Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации

### Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0

- Adobe Photoshop, версия до 7.0

- QuarkXPress, версия до 7.0

- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 15.06.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,67. Уч.-изд. л. 10,22 + 2 цв. вклейки. Цена договорная.

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



ОТЛИЧНАЯ СВАРКА

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ КОМПАНИИ «FRONIUS INTERNATIONAL» НА ВЫСТАВКЕ В КИЕВЕ

На состоявшейся 1–3 июня 2010 г. в Киеве выставке «Сварка. Родственные технологии» сотрудники дочернего отделения «Fronius International GmbH»–«ООО Фрониус Украина» демонстрировали инновационные разработки, впервые представленные в Украине широкой аудитории посетителей.

### Сварочная система для использования на судостроительных верфях и при работах в открытом море

Аппараты серии TransSteel Yard предназначены для использования в тяжелых рабочих условиях: тропических и полярных температурах, при максимальной влажности воздуха, а также в воздухе, где присутствуют примеси, способные вызвать коррозию, такие, как морская вода и песок. Системы доступны для классов мощности 350 и 500 А. Системы достигают данные значения при 40 % ПВ, а 250 или 360 А — при 100 % ПВ/40 °С.

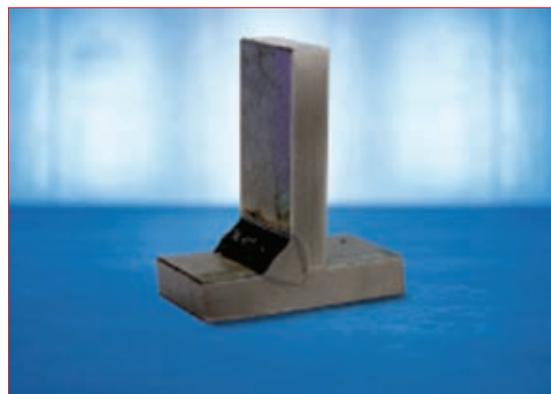
Прочный съемный блок подачи проволоки VR 5000 Yard является переносным: мобильность обеспечивает ручка или скользящая донная плита. Благодаря защитной плите, установленной сбоку на устройстве подачи, повышается ударопрочность, термостойкость и гибкость системы как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Подвесное устройство для крана, устанавливаемое в стандартной комплектации на устройстве подачи и на ходовой тележке, облегчает транспортировку краном.



В систему встроен регулятор расхода газа для настройки расхода газа на месте применения. Для работы в труднодоступных местах пользователь может одним нажатием кнопки на устройстве подачи проволоки переключить систему на работу с электродами. В этом случае вместо сварочной горелки используется кабель с держателем электрода.

Системный разъем Fronius (Fronius System Connector — FSC) подает все необходимые для сварочного процесса рабочие компоненты и обеспечивает максимальную надежность технологического процесса благодаря точному переносу тока, при этом не требуются внешние штекеры управления. Функция «ComfortWire» в сочетании с FSC упрощает заправку проволоки. Для заправки даже не требуется открывать подающие ролики.

Технология переноса стали обеспечивает, кроме стандартных характеристик, также характеристики для сварки высоколегированных сталей (CrNi) сплошной или порошковой проволокой. Благодаря характеристике «Steel on Primer» до минимума сокращается образование брызг при сварке металлических листов, обработанных первым грунтовым слоем, стальной проволокой сплошного сечения.



В результате глубокого и равномерного проплавления, а также надежного формирования корня шва достигается необходимая прочность угловых швов, которые так часто используются в судостроении. Графические характеристики можно настраивать непосредственно с механизма подачи проволоки. Превосходные характеристики сварки с применением порошковой проволоки специально созданы для самых стандартных работ в судостроении, при которых используются проволоки с рутитовым и основным видом сердечника, а также проволока с наполнением металлическим порошком.

\* Статья на правах рекламы.

### Трактор на магнитном основании

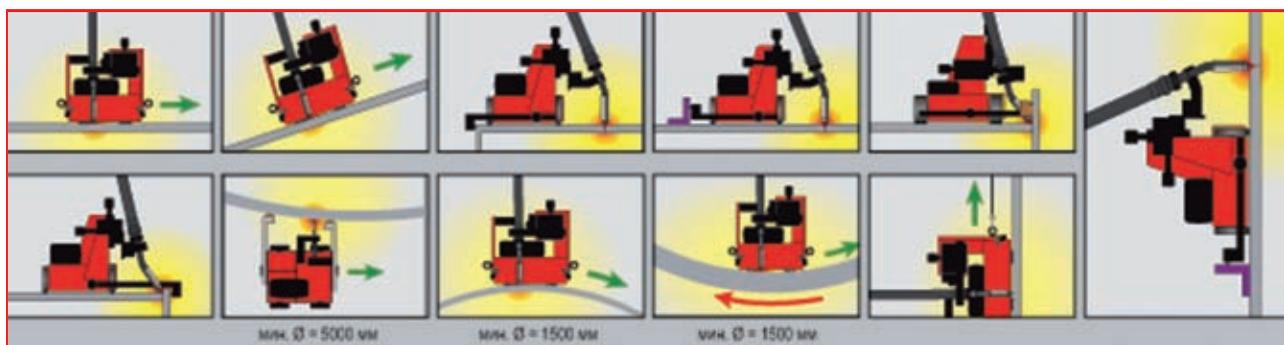
Для механизированной МИГ/МАГ сварки продольных швов в горизонтальном, наклонном и вертикальном положениях предлагается компактное оборудование — универсальные тракторы на магнитном основании FDV 15/MF и FDV 22/MF, оснащенные аккумуляторами.

Преимущества:

- ◆ мобильность, гибкость в использовании за счет отсутствия направляющих рельсов,
- ◆ возможность перемещения в любом пространственном положении за счет использования магнитного основания,
- ◆ отсутствие дополнительного кабеля питания (аккумулятор уже встроен в тележку),
- ◆ интуитивное простейшее управление.



Возможности применения весьма разнообразны:



### Система Contec

Важным условием получения высококачественных и воспроизводимых сварных соединений является контроль условий процесса. При сварке МИГ/МАГ трение скользящей проволоки ведет к износу в контактной трубке. В результате размеры и положение контактной поверхности изменяются. Это отрицательно влияет на параметры сварки. Инновационная контактная трубка **Contec** снижает эти негативные последствия до поддающегося расчету уровня. Это обеспечивает повышение стабильности технологического процесса и готовность оборудования, особенно при автоматизированной сварке.

Разработчики компании «Fronius» проектируют геометрию контактной трубки так, чтобы поверхность, соприкасающаяся с проволокой, была настолько велика, насколько это возможно, и так мала, насколько это необходимо. Благодаря этому удается, с одной стороны, добиться стабильного перехода тока, с другой — предотвратить преждевременное плавление проволоки из-за вызванного трением теплообразования. Контактная трубка состоит из двух элементов в форме конических полуцилиндров. Внутри этих элементов сварочный ток поступает в проволочный электрод, разделяясь на два пути. Пружина прижимает полуцилиндры друг к другу и к проходящей между ними проволоке с регулируемой силой. Ресурс трубки **Contec** в семь раз выше, чем у обычных контактных трубок, а расход материала составляет лишь одну пятую по сравнению с обычными токоподводящими мундштуками.



Контактная система **Contec** поддерживает связанные с износом изменения и, в первую очередь, их влияние на сварочные параметры в заданных пределах

ООО «Фрониус Украина» 07455, Киевская обл.,  
Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24  
Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44  
E-mail: sales.ukraine@fronius.com; www.fronius.ua



ГП «Опытный завод  
сварочных материалов  
ИЭС им. Е.О. Патона  
НАН Украины»

**Производство материалов для  
дуговой сварки, наплавки и резки:**

**Электроды** — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У, АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27, АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70, ТМА-1У, ТМА-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100, Т-590, АНР-2

**Порошковые проволоки** — ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4Н3Т, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

**Флюсы плавные** — по ГОСТ 9087-81, а также АН-М13, АН-25, АН-72

**Флюсы керамические** — АНК-40, АНК-47А, АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина	Тел.:	(044)	456-64-95
г. Киев-112			456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс:	(044)	456-64-95
			456-63-08

С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины



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

- > Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- > Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- > Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- > Пуско-наладочные работы
- > Широкий выбор сварочного оборудования



тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,  
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua  
Сервисный центр: (061) 270 2939. [www.triada-weld.com.ua](http://www.triada-weld.com.ua)

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**СпецСплав**

**ПРОИЗВОДСТВО:**

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной  
обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,  
напыления и металлзации

Электроды наплавочные, специального назначения,  
для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1  
г. Днепропетровск  
49051, Украина

Тел. (380562) 35-50-25  
Тел./факс (38056) 37-41-912  
E-mail [sp@spetsplav.dp.ua](mailto:sp@spetsplav.dp.ua)

**НАВКО-ТЕХ**

Automatic machines and robots for arc welding

**Автоматические установки и роботы  
для дуговой сварки и наплавки**



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ  
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ  
КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, Киев  
Тел.: +38 044 456-40-20  
Факс: +38 044 456-83-53

<http://www.navko-teh.kiev.ua> E-mail: [info@navko-teh.kiev.ua](mailto:info@navko-teh.kiev.ua)

**SELMA** ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»

## Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки.

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.



95000, г. Симферополь, Украина,  
ул. Генерала Васильева, 32А  
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55  
Факс: +38 (0652) 58-30-53  
E-mail: sales@selma.crimea.ua http://www.selma.ua

**ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»**

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2  
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50  
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.

На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН 348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

*МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ*  
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.



**ЗАВОД АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**ДОНМЕТ®**

Украина, г. Краматорск, тел./факс: (06264) 5-77-13  
svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

**Все для газовой резки и сварки. Электросварка.**

**100% гарантия от производителя**

**GYS** **ТБ**

**ДОНМЕТ®**

**ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ**

**КИЕВ • ДОНЕЦК**  
Тел./факс (044) 404-38-72 Тел./факс (062) 381-88-93

**ЗАПОРОЖЬЕ**  
Тел./факс (061) 224-11-56

**ПУГАНСК • ОДЕССА**  
Тел./факс (0642) 71-51-65 Тел./факс (048) 785-19-65



**Plasma Master** Научно-производственная фирма **ПЛАЗМА-МАСТЕР ЛТД.**

Лидер в Украине в области плазменно-порошковой наплавки

- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Плазмотроны для наплавки различных модификаций
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Услуги по наплавке деталей машин

Ручная плазменно-порошковая наплавка - прекрасный инструмент в ремонте!

Украина, 03680, Киев  
ул. Кржижановского, 3  
тел./факс: +38 044 537-31-44  
office@plasma-master.com.ua  
www.plasma-master.com.ua



**ОАО "ЗОНТ"**

**ПРОИЗВОДСТВО:**  
 МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";  
 МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";  
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";  
 МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";  
 МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С  
 ЧПУ ДЛЯ ФИГУРНОЙ РЕЗКИ ТРУБ;  
 ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЗУЩИХ МАШИН "РАДУГА";  
 НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ  
 КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

**ПОСТАВКА**  
 ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.  
**КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И  
 МОДЕРНИЗАЦИЯ**  
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.





**ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА «АВТОГЕНМАШ»)**  
 65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.

Т. + 38 (048) 717-00-50, E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA  
 715-69-40, WWW.ZONT.COM.UA  
 Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

**Днепрометиз**  
 Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО "Днепрометиз" - крупнейшее предприятие  
 Украины в своей отрасли, входит в международную  
 группу производителей "Северсталь-метиз"

e-mail: [sale@dm.severstalmetiz.com](mailto:sale@dm.severstalmetiz.com)

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97  
 Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты „Правда“, 20

**ПРОВОЛОКА:**  
 сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С  
 Вр-1 для армирования ЖБК  
 общего назначения без покрытия  
 термообработанная черная  
 оцинкованная  
 колючая

**СЕТКИ:**  
 плетеные  
 сварные  
 рифленые

**ЭЛЕКТРОДЫ:**  
 МР-3  
 АНО-4  
 АНО-6  
 АНО-21  
 УОНИ

**ГВОЗДИ  
 БОЛТЫ  
 ГАЙКИ  
 ШАЙБЫ**



[www.dneprometiz.com.ua](http://www.dneprometiz.com.ua)

Каховский завод  
 электросварочного оборудования

74800 Украина, г. Каховка. Тел./факс: +38 (050530) 2-99-82, 2-10-72  
[market@kzeso.com](mailto:market@kzeso.com) [www.kzeso.com](http://www.kzeso.com)



**СИЛА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ...**



**КЗЭСО**

Специальные Научные Разработки **СНР**  
 Научно-производственная фирма

**ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
 И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА**

**Магнитный  
 структуроскоп КРМ-Ц-К2М**

- остаточные напряжения
- конструкционные напряжения
- результаты термообработки
- усталостные изменения
- развитие опасных зон
- оценка ресурса
- предупреждение разрушений



- ✓ без зачистки
- ✓ через защитное покрытие **до 6 мм**
- ✓ без контактной жидкости

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06  
 | [www.krm-ndt.com](http://www.krm-ndt.com) | e-mail: [mail@krm-ndt.com](mailto:mail@krm-ndt.com)  
 в Москве - ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 502-93-61, [mail@mdiag.ru](mailto:mail@mdiag.ru)

Разработка, производство, внедрение

# СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки  
порошковые для  
сварки и наплавки,  
проволоки сплошные,  
электроды, флюс,  
наплавочные установки



ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине



ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»  
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина  
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17  
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua



**STEIN-MEGAFIL®**

МЫ НЕ ИЗОБРЕЛИ КОЛЕСО,  
НО МЫ ИЗОБРЕЛИ  
ПРОВОЛОКУ.

**STEIN-MEGAFIL®** - для решения Ваших задач в области сварки. Эта полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами создана для удовлетворения Ваших требований к сварке. Она отличается высокой конструктивной размерной стабильностью, не скручивается, не деформируется, благодаря чему идеально подходит для прецизионной сварки. Проволока влагостойка и, следовательно, не требует повторной сушки. Кроме того, она обладает прекрасной электропроводностью и обеспечивает стабильность горения дуги и формирования жидкой ванны.

**Drahtzug Stein**  
67317 Altleiningen (Germany)

Tel: +49(0)6356 966-0 info@drahtzug.com  
Fax: +49(0)6356 966-114 www.drahtzug.com

**DRAHTZUG STEIN**  
wire & welding

**ARCSEL**  
Официальный представитель в Украине  
83017, г. Донецк, пер. Вятский, 2а

тел.: (062) 332-2650(52) info@arcsel.dn.ua  
тел./факс: 382-9449, 332-2651 www.arcsel.dn.ua