

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона  
д.т.н. **С. И. Кучук-Яценко** (зам. гл. ред.),  
д.т.н. **В. Н. Липодаев** (зам. гл. ред.),  
д.т.н. **Ю. С. Борисов**,  
д.т.н. **Г. М. Григоренко**,  
к.ф.-м.н. **А. Т. Зельниченко**,  
д.т.н. **В. В. Кныш**,  
д.т.н. **И. В. Кривцун**, д.т.н. **Ю. Н. Ланкин**,  
д.т.н. **Л. М. Лобанов**,  
д.т.н. **В. Д. Позняков**,  
д.т.н. **И. А. Рябцев**, д.т.н. **К. А. Ющенко**  
**Т. В. Юштина** (отв. секр.)

Ученые университетов Украины  
д.т.н. **В. В. Дмитрик**, НТУ «ХПИ», Харьков,  
д.т.н. **В. В. Квасницкий**,  
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,  
к.т.н. **Е. П. Чвертко**,  
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,  
д.т.н. **М. М. Студент**, Физ.-механ. ин-т  
им. Г. В. Карпенко НАНУ, Львов

Зарубежные ученые  
д.т.н. **Н. П. Алешин**  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ  
д.т.н. **Гуань Цяо**  
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай  
д.х.н. **М. Зиниград**  
Ун-т Ариэля, Израиль  
д.т.н. **В. И. Лысак**  
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ  
д-р инж. **У. Райсген**  
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия  
д.т.н. **Я. Пилярчик**  
Ин-т сварки, Гливице, Польша  
д.т.н. **Г. А. Туричин**  
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Адрес редакции  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ  
03150, Украина, Киев-150,  
ул. Казимира Малевича, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

Учредители  
Национальная академия наук Украины,  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,  
МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001  
ISSN 0005-111X  
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Рекомендовано к печати  
редакционной коллегией журнала

Журнал входит в перечень утвержденных  
Министерством образования и науки  
Украины изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная  
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

## СОДЕРЖАНИЕ

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Рябцев И. А., Переплетчиков Е. Ф., Бартенев И. А.,  
Гордань Г. Н., Богайчук И. Л., Капитанчук Л. М.* Влияние  
амплитуды и частоты колебаний плазмотрона на химичес-  
кую и структурную неоднородность металла, наплавлен-  
ного плазменно-порошковым методом ..... 3
- Дмитрик В. В., Глушко А. В., Сыренко Т. А., Григоренко С. Г.*  
Особенности разупрочнения сварных соединений эксплуа-  
тируемых паропроводов ..... 9
- Серебряник И. П., Атрошенко М. Г., Полещук М. А.,  
Пузрин А. Л., Шевцов А. В.* Свойства сталемедного биме-  
талла, полученного напайкой в автономном вакууме ..... 15
- Кусков Ю. М., Биктагиров Ф. К., Грищенко Т. И., Евдоки-  
мов А. И.* Электрошлаковая наплавка высокохромистого  
чугуна на сталь 110Г13Л ..... 21

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П., Яшник А. Н., Миря-  
нин В. Н.* Применение критерия «утечка до разрушения»  
для предупреждения лавинного разрушения стенки  
вертикальных сварных резервуаров ..... 25
- Кусков Ю. М.* Влияние электрических параметров наплавки  
дискретной присадкой в токоподводящем кристаллизаторе  
на скорость вращения шлаковой ванны ..... 34
- Лобанов Л. М., Махлин Н. М., Коротынский А. Е., Водолаз-  
ский В. Е., Буряк В. Ю.* Современные аппаратно-програм-  
мные комплексы для подготовки сварщиков ..... 39

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- В Международном институте сварки ..... 46

## ХРОНИКА

- Всеукраинский конкурс студенческих научных работ  
по специальности «Сварка» ..... 48
- Памяти В. Г. Фартушного ..... 49

## Информация

- К 175-летию Н. Н. Бенардоса — изобретателя электри-  
ческой дуговой сварки ..... 51
- Электронно-лучевая технология: современное состояние  
и перспективы ..... 54
- Опыт сотрудничества компаний «RFA Robotics» и «Зерно-  
вой дом» в рамках концепции «Индустрия 4.0» ..... 58
- Новый сварочный процесс ArcTig компании Fronius ..... 61
- Календарь мая ..... 63

# Автоматичне Зварювання

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Головний редактор **Б. Є. Патон**

## ЗМІСТ

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- Рябцев І. О., Переплотчиков Є. Ф., Бартеєв І. А.,  
Гордань Г. М., Богайчук І. Л., Капітанчук Л. М.*  
Вплив амплітуди і частоти коливань плазматрона  
на хімічну та структурну неоднорідність металу, нап-  
лавленого плазмово-порошковим методом ..... 3
- Дмитрик В. В., Глушко А. В., Сиренко Т. А., Григо-  
ренко С. Г.* Особливості знеміцнення зварних з'єд-  
нань експлуатованих паропроводів ..... 9
- Серебряник І. П., Атрошенко М. Г., Полещук М. А.,  
Пузрін О. Л., Шевцов О. В.* Властивості сталемід-  
ного біметалу, отриманого напайкою в автоном-  
ному вакуумі ..... 15
- Кусков Ю. М., Биктагіров Ф. К., Грищенко Т. І.,  
Євдокимов О. І.* Електрошлакове наплавлення  
високохромистого чавуну на сталь 110Г13Л ..... 21

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- Барвінко А. Ю., Барвінко Ю. П., Яшник А. М.,  
Мірянін В. М.* Застосування критерію «виток до  
руйнування» для попередження лавинного руйну-  
вання стінки вертикальних зварних резервуарів ..... 25
- Кусков Ю. М.* Вплив електричних параметрів нап-  
лавлення дискретною присадкою в струмопідвід-  
ному кристалізаторі на швидкість обертання шла-  
кової ванни ..... 34
- Лобанов Л. М., Махлін Н. М., Коротинський О. Є.,  
Водолазський В. Є., Буряк В. Ю.* Сучасні апаратно-  
програмні комплекси для підготовки зварюва-  
льників ..... 39

### КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

- У Міжнародному інституті зварювання ..... 46

### ХРОНІКА

- Всеукраїнський конкурс студентських наукових  
робіт за спеціальністю «Зварювання» ..... 48
- Пам'яті В. Г. Фартушного ..... 49

### ІНФОРМАЦІЯ

- До 175-річчя М. М. Бенардоса — винахідника  
електричного дугового зварювання ..... 51
- Електронно-променева технологія: сучасний стан  
та перспективи ..... 54
- Досвід співпраці компаній «RFA Robotics»  
та «Зерновий будинок» в рамках концепції  
«Індустрія 4.0» ..... 58
- Новий зварювальний процес ArcTig  
компанії Fronius ..... 61
- Календар травня ..... 63

Журнал «Автоматичне зварювання» видається  
англійською мовою під назвою «The Paton Welding Journal»

#### Адреса редакції

03150, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-63-02  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

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

## CONTENTS

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Ryabtsev I. A., Pereplechikov E. F., Bartenev I. A.,  
Gordan G. N., Bogaychuk I. L., Kapitanchuk L. M.*  
Effect of amplitude and frequency of plasmatron  
oscillations on chemical and structural inhomogeneity  
of metal deposited by plasma-powder method ..... 3
- Dmitrik V. V., Glushko A. V., Syrenko T. A., Hryhoren-  
ko S. G.* Features of embrittlement of welded joints  
of operated steam pipelines ..... 9
- Serebryanik I. P., Atroshenko M. G., Poleshchuk  
M. A., Puzrin A. L., Shevtsov A. V.* Properties of  
steel-copper bimetal produced by brazing  
in autonomous vacuum ..... 15
- Kuskov Yu. M., Biktagirow F. K., Grishchenko T. I.,  
Evdokimov A. I.* Electroslag surfacing of high-chro-  
mium cast iron with 110G13L steel ..... 21

### INDUSTRIAL

- Barvinko A. Yu., Barvinko Yu. P., Yashnik A. N.,  
Miryandin V. N.* Application of «leak before break»  
criterion for prevention of avalanche fracture of the  
wall of vertical steel tanks ..... 25
- Kuskov Yu. M.* Influence of electric parameters  
of surfacing with discrete filler in current-supplying  
mould on velocity of slag pool rotation ..... 34
- Lobanov L. M., Makhlin N. M., Korotynsky A. E.,  
Vodolazsky V. E., Buryak V. Yu.* Modern hardware-sof-  
tware complexes for training of welders ..... 39

### BRIEF INFORMATION

- At the International Institute of Welding ..... 46

### NEWS

- All-Ukrainian Competition of Student Research Works  
in the field of «Welding» ..... 48
- In memory of V.G. Fartushny ..... 49

### INFORMATIONS

- To 175th anniversary of N.N. Benardos — inventor  
of electric arc welding ..... 51
- Electron beam technology: current state and  
prospects ..... 54
- Experience of cooperation of «RFA Robotics» and  
«Zernovoy Dom» Companies within the concept  
of «Industry 4.0» ..... 58
- New welding process ArcTig of Fronius Company ..... 61
- May calendar ..... 63

«Avtomaticheskaya Svarka» (Automatic Welding) journal is republished  
in English under the title «The Paton Welding Journal»

#### Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine  
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-63-02  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

# ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЛАЗМОТРОНА НА ХИМИЧЕСКУЮ И СТРУКТУРНУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВЫМ МЕТОДОМ

И. А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ<sup>1</sup>, И. А. БАРТЕНЕВ<sup>2</sup>, Г. Н. ГОРДАНЬ<sup>1</sup>,  
И. Л. БОГАЙЧУК<sup>1</sup>, Л. М. КАПИТАНЧУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>КарГТУ. 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, бульвар Мира, 56. E-mail: igor\_svar@mail.ru

Изучено влияние амплитуды и частоты колебаний плазмотрона на формирование наплавленных валиков, характер проплавления основного металла, а также на структурную и химическую неоднородность в зоне соединения наплавленного и основного металлов. Наибольшее влияние на форму валика и его микроструктуру оказывает амплитуда колебаний плазмотрона — с увеличением амплитуды увеличивается ширина валика и снижается его высота. Исследовали также влияние частоты колебаний плазмотрона на характер проплавления основного металла и на химическую и структурную неоднородность в зоне соединения основного и наплавленного металла вдоль направления наплавки. При наплавке с колебаниями плазмотрона наблюдается волнистая конфигурация границы соединения наплавленного и основного металлов в продольном направлении с большей частотой выступов и впадин, которая повторяет частоту колебаний плазмотрона. Установлено, что с увеличением частоты колебаний плазмотрона, и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание основных легирующих элементов резко меняется. Библиогр. 6, рис. 11.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* плазменно-порошковая наплавка, колебания плазмотрона, амплитуда и частота колебаний, проплавление основного металла, химическая и структурная неоднородность, формирование наплавленного металла

Известно, что плазменно-порошковая наплавка в большинстве случаев выполняется с колебаниями плазмотрона. Это позволяет за один проход наплавлять валики заданной ширины и высоты с минимальным проплавлением основного металла [1–6]. Анализ показывает, что, если не учитывать электрические показатели режима наплавки и скорость подачи порошка, то основное влияние на эти характеристики наплавленных валиков оказывают амплитуда и частота колебаний плазмотрона, а также скорость наплавки. Причем, все эти характеристики взаимосвязаны, и при изменении одной из них для получения качественных наплавленных валиков необходимо корректировать две другие характеристики.

Целью настоящих исследований было изучение влияния амплитуды и частоты колебаний плазмотрона на формирование наплавленных валиков, характер проплавления основного металла, а также на структурную и химическую неоднородность в зоне соединения наплавленного и основного металлов.

На первом этапе исследовано влияние амплитуды и частоты колебаний плазмотрона, а также тока наплавки на формирование валиков наплавленного металла. При этом амплитуда изменялась в пределах 0...7 мм, частота — 30...90 мин<sup>-1</sup>, ток — 210...270 А. Скорость наплавки состав-

ляла 10 м/ч, подача порошка 3,3 кг/ч, присадочный порошок ПР-10Р6М5. Наплавку одиночных валиков выполняли на пластины стали Ст3 толщиной 15 мм. Исследования формы валиков и их структуры выполняли на поперечных макро- и микрошлифах.

Наиболее значительное влияние на форму валика и его микроструктуру оказывает амплитуда колебаний плазмотрона. С увеличением амплитуды увеличивается ширина валика и снижается его высота (рис. 1, а). При наплавке без колебаний ( $A = 0$ ) на токе 240...245 А валик высокий и имеет небольшой подворот (коэффициент формы валика равен 1,8), хотя в целом формирование хорошее. При амплитуде 2...3 мм формирование хорошее, в поперечном сечении валик имеет полукруглую форму с углом смачивания менее 90°. С дальнейшим увеличением амплитуды колебаний ширина валика  $b$  увеличивается, а его высота  $h$  уменьшается, и валик становится более плоским.

Влияние тока наплавки на форму валика обычное, т. е. с возрастанием тока валик становится ниже и шире (рис. 1, б). Но даже при довольно больших для скорости 10 м/ч значениях тока (270 А) и подачи порошка (3,3 кг/ч), наплавка с колебаниями позволяет избежать заметного проплавления основного металла.

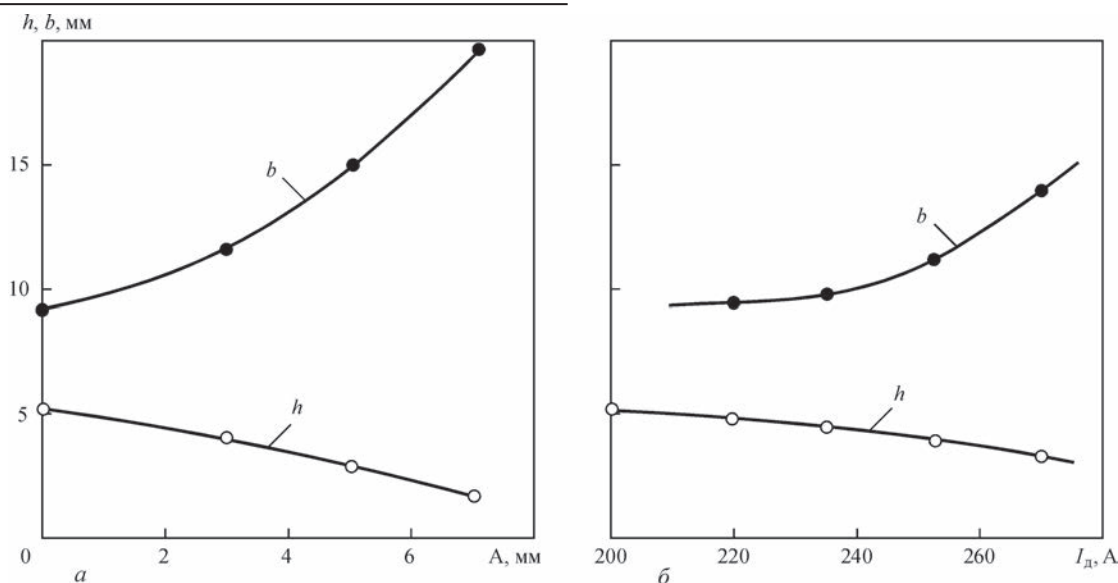


Рис. 1. Влияние амплитуды колебаний  $A$  ( $I_d = 245$  А; частота колебаний  $f = 70$  мин<sup>-1</sup>) (а) и тока  $I_d$  ( $A = 3$  мм;  $f = 70$  мин<sup>-1</sup>) (б) на высоту  $h$  и ширину  $b$  наплавленного валика

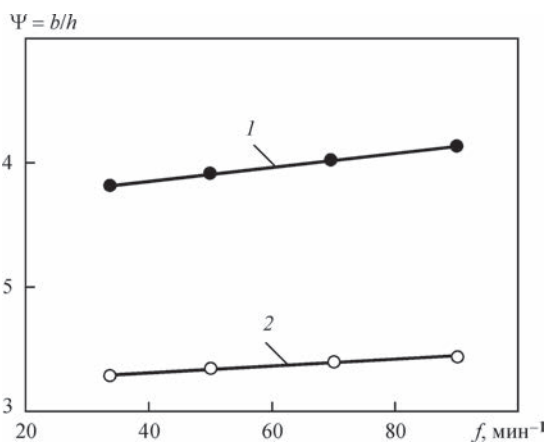


Рис. 2. Влияние амплитуды  $A$  и частоты колебаний плазмотрона  $f$  на форму наплавленного валика ( $I_d = 245$  А): 1 —  $A = 5$  мм; 2 — 25

Увеличение частоты колебаний плазмотрона очень мало влияет на коэффициент формы валика (рис. 2), причем он возрастет за счет весьма не-

значительного снижения высоты валика, т. е. валик становится более плоским. Хорошее формирование краев валика отмечается при частоте более 60 мин<sup>-1</sup>.

Микроструктура наплавленного металла при значениях амплитуды колебаний плазмотрона 0...3 мм отличается крупным зерном (рис. 3, а). При амплитуде 5 мм и более значительно возрастает доля мелких, почти равноосных зерен (рис. 3, б), которые при наплавке без колебаний присутствуют лишь в незначительных количествах вблизи линии сплавления и в поверхностной зоне валиков.

На следующем этапе были проведены исследования влияния частоты колебаний плазмотрона на характер проплавления основного металла и на химическую и структурную неоднородность в зоне соединения основного и наплавленного металла вдоль направления наплавки. Эксперименты проводились на следующих режимах: амплитуда колебаний  $A = 10$  мм; частота колебаний  $f$ : обра-

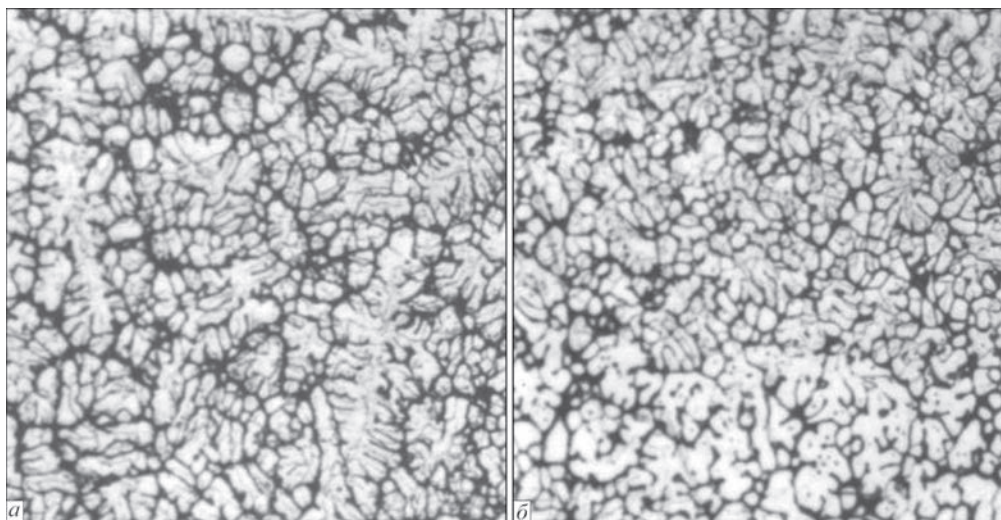


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 300$ ) наплавленного металла типа стали Р6М5 при  $I_d = 245$  А: а —  $A = 0$  мм,  $f = 0$  мин<sup>-1</sup>; б —  $A = 5$  мм,  $f = 70$  мин<sup>-1</sup>





Рис. 4. Внешний вид валиков, наплавленных плазменно-порошковым методом с колебаниями плазмотрона при частоте,  $\text{мин}^{-1}$ : 1 — 40; 2 — 60; 3 — 90 (амплитуда колебаний — 10 мм)

зец 1 — 40  $\text{мин}^{-1}$ , образец 2 — 60  $\text{мин}^{-1}$ , образец 3 — 90  $\text{мин}^{-1}$ ; ток — 180 А; скорость наплавки — 10,5 м/ч; подача порошка — 3,0 кг/ч, присадочный порошок ПР-Х18Н9. Внешний вид наплавленных валиков приведен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что с увеличением частоты колебаний плазмотрона, при неизменной амплитуде колебаний плазмотрона и скорости наплавки, формирование наплавленных валиков улучшается, валики становятся более гладкими. При этом чешуйчатость на поверхности валиков соответствует частоте колебаний плазмотрона.

Наплавленные валики были разрезаны по центру вдоль продольной оси. После шлифовки и полировки образцы протравлены электролитическим методом в растворе хромовой кислоты и проведены их металлографические исследования. Такая подготовка образцов позволила оценить структурную и химическую неоднородность

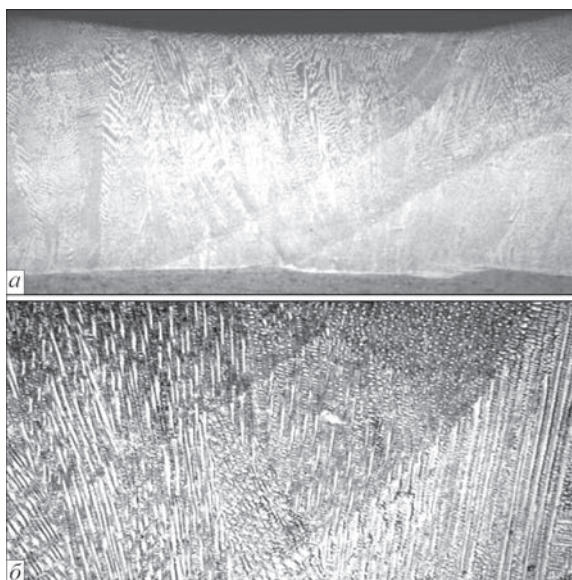


Рис. 5. Продольное сечение наплавленного валика 1: а — макроструктура ( $\times 20$ ); б — микроструктура ( $\times 100$ )

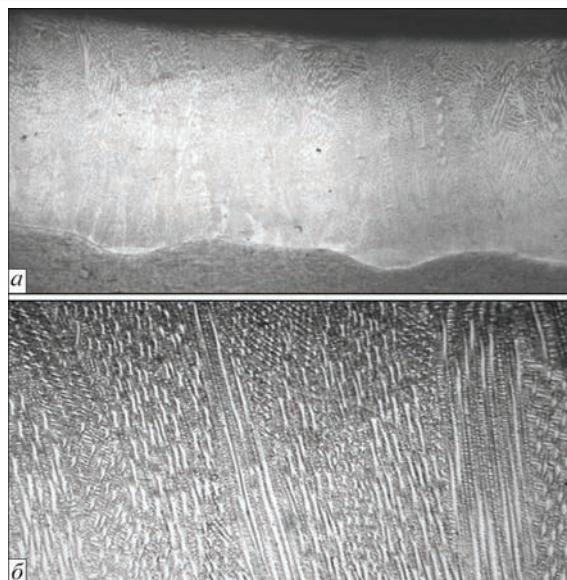


Рис. 6. Продольное сечение наплавленного валика 2: а — макроструктура ( $\times 20$ ); б — микроструктура ( $\times 100$ )

в зоне соединения основного и наплавленного металлов по длине наплавленных валиков.

При увеличении  $\times 20$  на продольном шлифе наплавленного валика 1 (рис. 5, а) зафиксирована четкая и достаточно ровная линия сплавления, с небольшими впадинами (увеличением проплавления) в местах прохождения плазменной дуги.

Кристаллизация наплавленного металла дендритная (рис. 5, б). Микроструктура состоит из аустенитной матрицы и выделений  $\delta$ -феррита по границам кристаллитов. Ширина кристаллитов составляет 20...35 мкм. При поперечном перемещении плазмотрона при наложении одного слоя на другой видна граница между ними и область перекрытия, причем граница между слоями сохраняется от поверхности наплавленного металла к линии сплавления с основным металлом.

Со стороны наплавленного металла располагается переходный слой, имеющий промежуточную твердость между твердостью наплавленного и основного металла. Ширина этого слоя составляет 5...50 мкм и зависит от проплавления основного металла, т. е. от изменения состава наплавленного слоя при перемешивании основного и наплавленного металла. Ширина ЗТВ для наплавленного валика 1 составляет 2600...2700 мкм.

На рис. 6 приведена макро- и микроструктура наплавленного валика 2. В этом случае линия сплавления наплавленного металла с основным металлом имеет волнистый характер, с чередующимися впадинами и выступами, повторяющими колебания плазмотрона (рис. 6, а). При этом впадины (местное увеличение глубины проплавления) соответствуют местам непосредственного прохождения плазменной дуги, а выступы (местное снижение глубины проплавления) — результат воздействия на основной металл периферий-

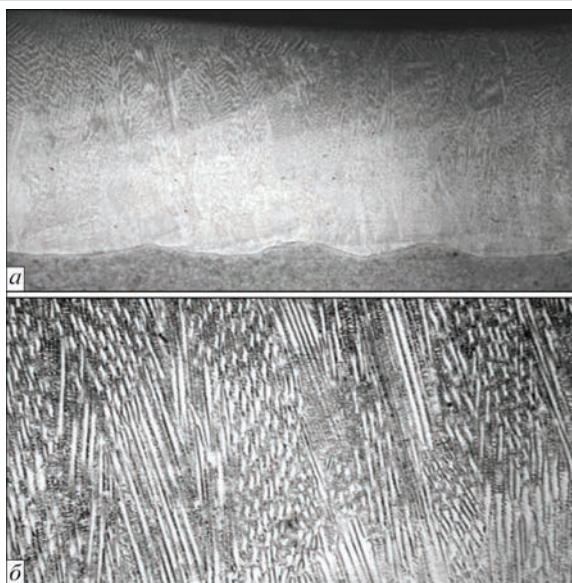


Рис. 7. Продольное сечение напавленного валика 3: *а* — макроструктура ( $\times 20$ ); *б* — микроструктура ( $\times 100$ )

ной зоны дуги. Кристаллизация напавленного металла дендритная, во впадинах напавленный металл имеет более дисперсную ячеистую структуру. Столбчатые кристаллиты прорастают от линии сплавления с основным металлом к поверхности образца и имеют ширину 15...20 мкм.

При поперечном перемещении плазматрона при наложении одного слоя на другой, видимая граница между соседними слоями (в отличие от валика 1) не фиксируется, что свидетельствует о хорошем перемешивании напавленного металла (рис. 6, *б*). Ширина переходного слоя вдоль линии сплавления составляет 2...40 мкм. Ширина ЗТВ — 3700 ... 3800 мкм.

На рис. 7 представлена макро- и микроструктура напавленного валика 3. Линия сплавления напавленного и основного металла также имеет

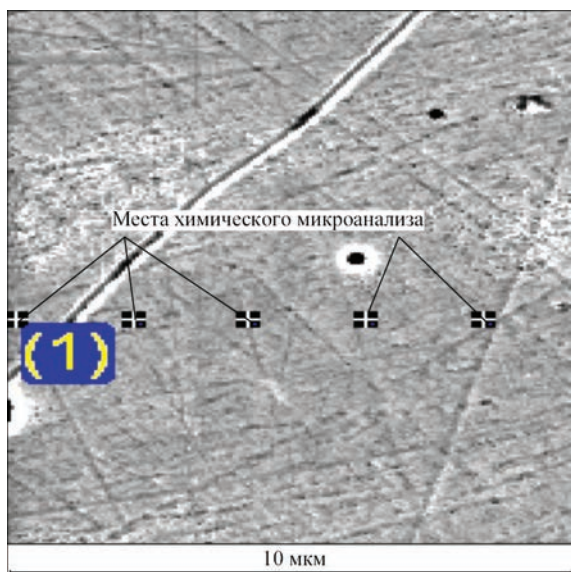


Рис. 8. Иллюстрация проведения химического микроанализа на Оже-микронде

волнистый характер, но с бо́льшей частотой выступов и впадин, чем в напавленном валике 2, что объясняется более высокой частотой колебаний плазматрона (рис. 7, *а*). По линии соединения со сталью Ст3 наблюдается тонкий слой переменной ширины от 2 до 20 мкм. Ширина ЗТВ составляет 4200...4500 мкм. Четко видны вытянутые кристаллиты, которые расположены перпендикулярно к линии сплавления и которые имеют ширину 15...20 мкм. Микроструктура напавленного металла валика 3 аналогична микроструктуре напавленных валиков 1 и 2 и состоит из аустенита и  $\delta$ -феррита, расположенного по границам кристаллитов.

Исследовали химический состав напавленного и основного металла поперек линии их сплавления. Расстояние между соседними замерами составляло приблизительно 2 мкм (рис. 8). Исследования проводили на Оже-микронде Jamp-9500F фирмы «JEOL», оборудованном энергодисперсионным рентгеновским спектрометром INCA Penta FETx3. Энергия первичного электронного пучка составляла 10 кэВ при токе зонда 500 пА. Перед исследованием проводилась очистка поверхности

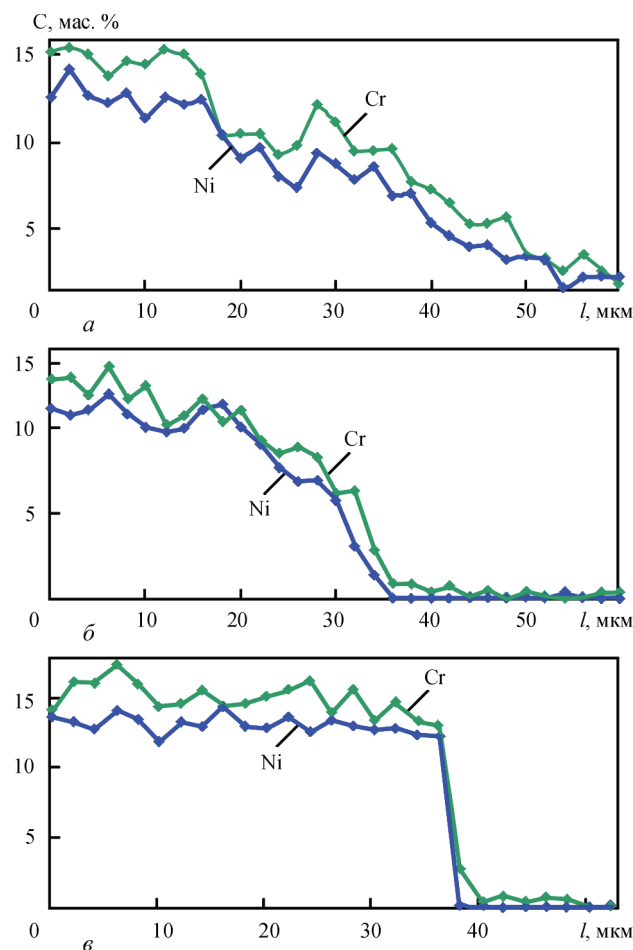


Рис. 9. Распределение хрома и никеля в образце 1 в зоне сплавления: *а* — прямой участок на линии сплавления; *б* — впадина на линии сплавления; *в* — выступ на линии сплавления



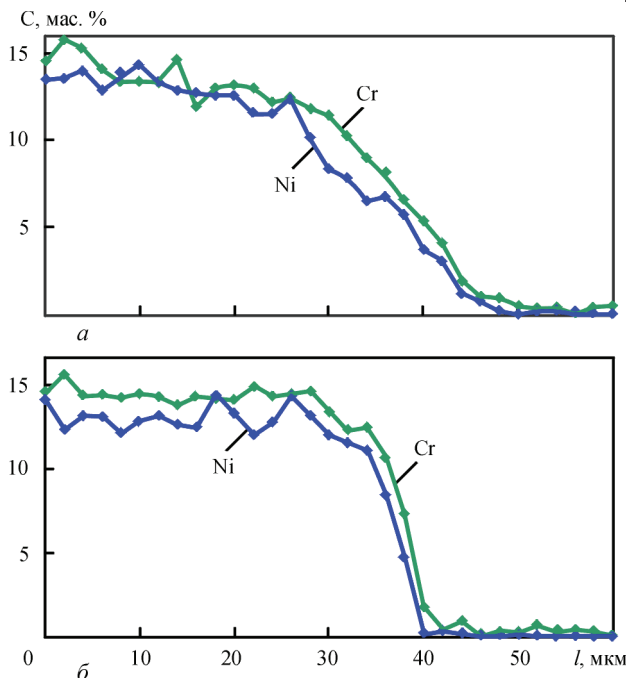


Рис. 10. Распределение хрома и никеля в образце 2 в зоне сплавления: а — впадина на линии сплавления; б — выступ на линии сплавления

образцов ионами аргона  $\text{Ar}^+$  с энергией 500 эВ в течение 10 мин (скорость травления составляла 1 нм/мин).

На образце 1 исследовали распределение основных легирующих элементов (никеля и хрома) на прямом участке, выступе и впадине на линии сплавления основного и наплавленного металлов (рис. 9).

В образцах 2 и 3, наплавленных с более высокой частотой колебаний плазматрона, выделить на линии сплавления прямолинейные участки достаточной протяженности для проведения анализов оказалось затруднительным. По этой причине на этих образцах распределение основных легирующих элементов (никеля и хрома) исследовали на выступе и впадине на линии сплавления основного и наплавленного металлов (рис. 10, 11). В этих образцах, по сравнению с образцом 1, наблюдается более резкое изменение содержания основных легирующих элементов наплавленного металла на границе сплавления.

Следует отметить, что с увеличением частоты колебаний возрастает скорость поперечного перемещения плазматрона, соответственно уменьшается время непосредственного воздействия плазменной дуги на основной металл. Именно этим, по-видимому, можно объяснить тот факт, что с увеличением частоты колебаний плазматрона и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание основных легирующих элементов резко меняется от наплавленного к основному металлу.

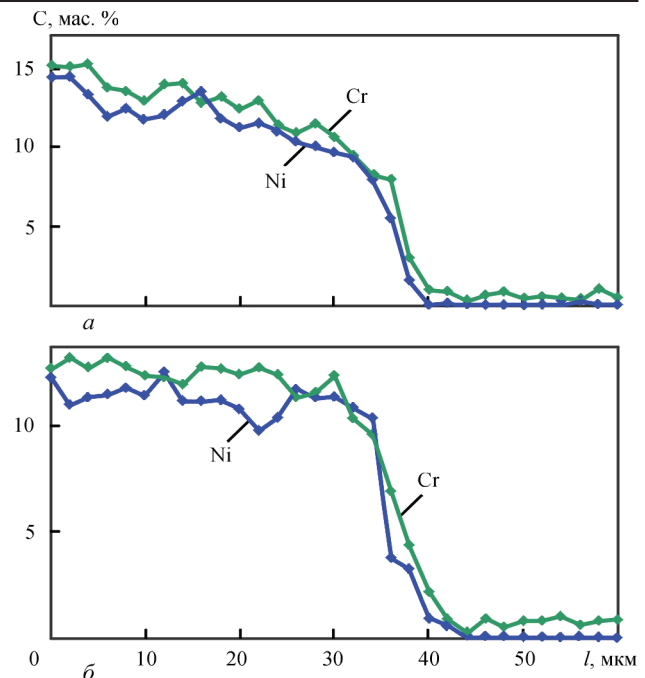


Рис. 11. Распределение хрома и никеля в образце 3 в зоне сплавления: а — впадина на линии сплавления; б — выступ на линии сплавления

## Выводы

1. При плазменно-порошковой наплавке исследовано влияние амплитуды и частоты колебаний плазматрона на формирование наплавленных валиков. При неизменных других показателях режима наплавки (скорость наплавки, ток, скорость подачи порошка) наиболее значительное влияние на форму валика оказывает амплитуда колебаний плазматрона — с ее увеличением растет ширина валика и снижается его высота.

2. Исследования влияния частоты колебаний плазматрона на структурную неоднородность металла, наплавленного плазменно-порошковым методом, показали:

линия сплавления наплавленного и основного металлов в продольном направлении имеет волнистый характер с частотой выступов и впадин, которая повторяет частоту колебаний плазматрона; при этом впадины (местное увеличение глубины проплавления) соответствуют траектории непосредственного прохождения плазменной дуги, а выступы (местное снижение глубины проплавления) — результат воздействия на основной металл периферийной зоны дуги;

при увеличении частоты колебаний плазматрона с 40 до 90  $\text{мин}^{-1}$  происходит лучшее перемешивание слоев наплавленного металла, выравнивание и измельчение структуры по его сечению.

3. С увеличением частоты колебаний плазматрона и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание леги-

руюющих элементов на этой границе резко меняется от наплавленного к основному металлу.

### Список литературы

1. Гладкий П. В., Фрумин И. И. (1965) Плазменная наплавка. *Автоматическая сварка*, **3**, 23–27.
2. Вайнерман А. Е., Шоршоров М. Х., Веселков В. Д., Новосадов В. С. (1969) *Плазменная наплавка металлов*. Ленинград, Машиностроение.
3. Вайнерман А. Е., Захаров В. Ф., Сютчев А. Н. (1975) *Наплавка сжатой дугой нержавеющей стали на углеродистые и низколегированные стали*. Ленинград, ЛДНТП.
4. Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. (2007) *Плазменно-порошковая наплавка в арматуростроении*. Киев, Экотехнология.
5. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. (2007) *Плазменно-порошковая наплавка*. Киев, Экотехнология.
6. Рябцев И. А., Сенченков И. К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Экотехнология.

### References

1. Gladky, P.V., Frumin, I.I. (1965) Plasma surfacing. *Avtomatic. Svarka*, **3**, 23–27 [in Russian].
2. Vajnerman, A.E., Shorshorov, M.Kh., Veselkov, V.D., Novosadov, V.S. (1969) *Plasma surfacing of metals*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Vajnerman, A.E., Zakharov, V.F., Syutiev, A.N. (1975) *Surfacing with constricted arc of stainless steel on low-carbon and low-alloy steels*. Leningrad, LDNTP [in Russian].
4. Pereplyotnikov, E.F., Ryabtsev, I.A. (2007) *Plasma-powder surfacing in reinforcement engineering*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
5. Gladky, P.V., Pereplyotnikov, E.F., Ryabtsev, I.A. (2007) *Plasma-powder surfacing*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
6. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing operations*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].

І. О. Рябцев<sup>1</sup>, Є. Ф. Переpletчиков<sup>1</sup>, І. А. Бартенев<sup>2</sup>,  
Г. М. Гордань<sup>1</sup>, І. Л. Богайчук<sup>1</sup>, Л. М. Капітанчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>КарДТУ. 100027, Республіка Казахстан, м. Караганда,  
бульвар Миру, 56. E-mail: igor\_svar@mail.ru

### ВЛИВ АМПЛИТУДИ І ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ ПЛАЗМОТРОНА НА ХІМІЧНУ ТА СТРУКТУРНУ НЕОДНОРІДНІСТЬ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕННОГО ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВИМ МЕТОДОМ

Вивчено вплив амплітуди і частоти коливань плазмотрона на формування наплавлених валиків, характер проплавлення основного металу, а також на структурну і хімічну неоднорідність в зоні з'єднання наплавленого і основного металів. Найбільший вплив на форму валика і його мікроструктуру надає амплітуда коливань плазмотрона — зі збільшенням амплітуди збільшується ширина валика і знижується його висота. Досліджували також вплив частоти коливань плаз-

матрона на характер проплавлення основного металу і на хімічну та структурну неоднорідність в зоні з'єднання основного і наплавленого металу вздовж напрямку наплавлення. При наплавленні з коливаннями плазмотрона спостерігається хвиляста конфігурація границі з'єднання наплавленого і основного металів в поздовжньому напрямку з більшою частотою виступів і западин, яка повторює частоту коливань плазмотрона. Встановлено, що зі збільшенням частоти коливань плазмотрона і на виступах, і на западинах на границі сплаву зменшується перемішування наплавленого і основного металів і зміст основних легуючих елементів різко змінюється. Бібліогр. 6, рис. 11.

**Ключові слова:** плазмово-порошкове наплавлення, коливання плазмотрона, амплітуда і частота коливань, проплавлення основного металу, хімічна і структурна неоднорідність, формування наплавленого металу

I. A. Ryabtsev<sup>1</sup>, E. F. Perepletchikov<sup>1</sup>, I. A. Bartenev<sup>2</sup>,  
G. N. Gordan<sup>1</sup>, I. L. Bogaychuk<sup>1</sup>, L. M. Kapitanchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Karaganda State Technical University  
56 Mira Str., Karaganda, 100027, Kazakhstan.  
E-mail: igor\_svar@mail.ru

### EFFECT OF AMPLITUDE AND FREQUENCY OF PLASMATRON OSCILLATIONS ON CHEMICAL AND STRUCTURAL INHOMOGENEITY OF METAL DEPOSITED BY PLASMA-POWDER METHOD

Effect of amplitude and frequency of plasmatron oscillation on formation of deposited beads, nature of base metal penetration as well as structural and chemical inhomogeneity in zone of joining of deposited and base metal was investigated. The plasmatron oscillation frequency has the largest effect on bead shape and its microstructure, increase of amplitude rises bead width and decrease of its height. Effect of plasmatron oscillation frequency on nature of base metal penetration and chemical and structural inhomogeneity in zone of joining of base and deposited metals along deposition direction was also investigated. In deposition with plasmatron oscillations there is a wavy configuration of interface of deposited and base metals in longitudinal direction with larger frequency of projections and depressions, which repeats plasmatron oscillation frequency. It is determined that increase of plasmatron oscillation frequency on projections as well as depressions on fusion boundary promotes decrease of deposited and base metals and content of main alloying elements rapidly falls. 6 Ref., 11 Fig.

**Keywords:** plasma-powder surfacing, oscillation plasmatron, amplitude and frequency of oscillations, base metal penetration, chemical and structural inhomogeneity, formation of deposited metal

Поступила в редакцию 26.03.2018



# ОСОБЕННОСТИ РАЗУПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПАРОПРОВОДОВ

В. В. ДМИТРИК<sup>1</sup>, А. В. ГЛУШКО<sup>1</sup>, Т. А. СЫРЕНКО<sup>2</sup>, С. Г. ГРИГОРЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НТУ «ХПИ». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2. E-mail: svarka126@ukr.net

<sup>2</sup>Харьковский машиностроительный колледж. 61068, г. Харьков, ул. Плехановская, 79

<sup>3</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проявление возврата в металле сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести, характеризуется определенными структурными изменениями. Такие изменения обеспечивают разупрочнение металла сварных соединений. В работе рассмотрены особенности структурных и деформационных изменений, а также проявление диффузии, которые происходят в процессе возврата и приводят к разупрочнению металла сварных соединений паропроводов, при их наработке свыше 270 тыс. ч. Библиогр. 10, рис. 7.

*Ключевые слова:* сварные соединения паропроводов, возврат, структурное состояние, разупрочнение, дислокации, диффузия, зона термического влияния

Процессы разупрочнения и повреждаемости металла паропроводов ТЭС, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести, имеют большое практическое значение. В металле паропроводов (в большей степени в их сварных соединениях), длительно эксплуатируемых при температуре 545...585 °С и напряжении 20...25 МПа, происходят определенные структурные изменения, снижение свойств, повреждаемость и разрушаемость.

Структурные изменения на первой и второй стадиях ползучести обеспечиваются проявлениями процессов возврата, полигонизации и рекристаллизации. Каждый из приведенных процессов следует рассматривать с учетом особенностей другого процесса как сопряженного рассматриваемому. Выявление особенностей процессов возврата, полигонизации и рекристаллизации актуально для снижения скорости их прохождения, и, следовательно, для уменьшения уровня деградации структуры и повреждаемости металла.

Целью работы является изучение особенностей процесса возврата, контролирующего структурное состояние металла, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести сварных соединений паропроводов.

Стали паропроводов (12Х1МФ, 15Х1М1Ф) применяются как термически и дисперсно-упрочненные. Стабильность их структуры в условиях эксплуатации зависит не только от свободной энергии металла, но и от наличия и распределения дефектов кристаллической решетки. В этой связи не представляется возможным описать известным экспоненциальным законом кинетику процесса разупрочнения металла сварных соединений.

Металл сварных соединений характеризуется наличием напряжений третьего рода, образующих-

ся в кристаллах  $\alpha$ -фазы при определенном отсутствии когерентности с выделениями вторых фаз ( $M_3C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ), в меньшей мере  $Mo_2C$  и  $VC$ . Отсутствие когерентности увеличивается при наличии коагуляции  $M_7C_3$  и особенно  $M_{23}C_6$ . Заметим, что особенность коагуляции карбидов I группы, расположенных по границам зерен, требует уточнения, так как процессы их коалесценции существенно отличаются (рис. 1) [1].

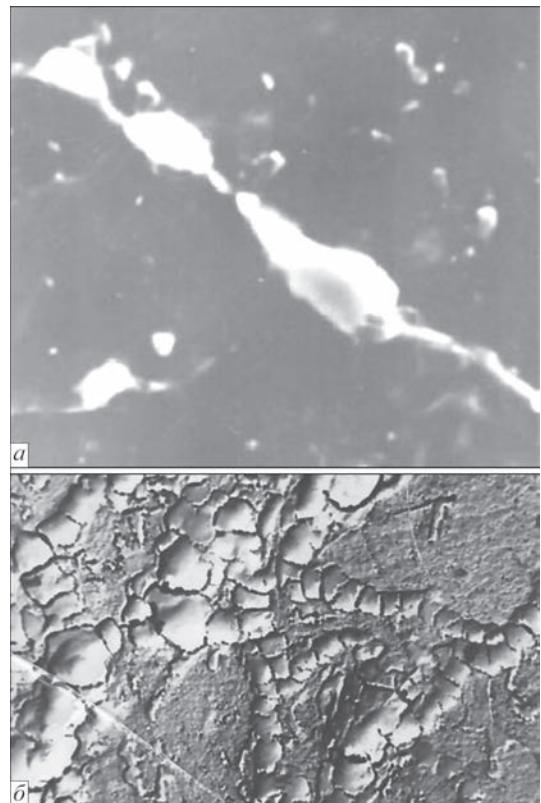


Рис. 1. Коагуляция карбидов путем коалесценции: а — карбиды  $M_{23}C_6$  ( $\times 7500$ ); б — карбиды  $M_7C_3$  ( $\times 6000$ )

Отличие возврата, имеющего место в металле эксплуатируемых паропроводов, от возврата как снятия наклепа в деформированном металле, состоит в том, что при снятии наклепа происходит выделение запасенной ранее энергии, а возврат в металле паропроводов реализуется при одновременном введении энергии (преимущественно) и при незначительном (5...7 %) ее выделении. Возврат в рассматриваемой структуре обеспечивается только термической активацией и характеризуется отсутствием инкубационного периода. В процессе возврата в структуре металла паропроводов (и их сварных соединений) кристаллографическая ориентация зерен  $\alpha$ -фазы не меняется, однако имеют место тонкие структурные изменения и некоторые изменения точечных дефектов. Уровень возврата зависит от исходного структурного состояния металла сварных соединений, в том числе от предшествующего распределения дислокаций.

Явление возврата, в общем, свойственно металлу рассматриваемых сварных соединений применительно к их наработке примерно от 250 тыс. ч. Изучение особенностей структурных изменений, обеспечиваемых процессами возврата выявлять известными способами измерения электросопротивления на участках зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений, на наш взгляд, весьма затруднительно. Возврат металла сварных соединений характеризуется наличием локального разупрочнения (рис. 2) и снижением на 15...20 % предела текучести, что связано со структурной неоднородностью их ЗТВ. В процессе возврата в металле сварных соединений происходит диффузионное перемещение хрома, молибдена, ванадия, кремния и марганца из цен-

тральных зон зерен  $\alpha$ -фазы в их приграничные зоны, что обеспечивает образование сегрегаций [2, 3]. Увеличение диффузионной подвижности хрома, молибдена и ванадия приводит к увеличению количества  $\text{Mo}_2\text{C}$  и  $\text{VC}$ , а также  $\text{M}_7\text{C}_3$ ,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ . Количество хрома, молибдена и ванадия в карбидах увеличивается при соответствующем их уменьшении в кристаллах  $\alpha$ -фазы.

Установили, что в металле участков ЗТВ, а также в металле шва и в основном металле с различной интенсивностью проходят процессы разупрочнения. Локально, на участках ЗТВ, металл может и упрочняться, однако, преобладающим эффектом является разупрочнение (рис. 2). Наибольшее относительное разупрочнение характерно для участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ.

Рассматривая возврат как замедленный процесс разупрочнения во времени, применительно к сварному соединению, уточненную зависимость [4] запишем в виде:

$$X = 1 - \exp \left[ -kmt \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \right],$$

где  $X$  — доля разупрочненного металла за время  $t$ ;  $E$  — энергия активации;  $T$  — температура;  $R$  — постоянная Больцмана;  $k$  — параметр, экспоненциально зависящий от температуры;  $m$  — параметр, зависящий от структурного состояния сварного соединения.

Составляющими механизма возврата являются образование, перемещение и аннигиляция точечных дефектов. В условиях рабочих температур и напряжений избыточные вакансии являются подвижными. Вакансии преимущественно перемещаются к границам зерен, в меньшей степени к границам субзерен и фрагментов, а также к дислокациям. Целесообразно выявить сток вакансий к границам зерен, что позволит уменьшить их концентрацию.

В процессе возврата диффузионное перемещение хрома, молибдена и ванадия имеет направленный характер и происходит по вакансионному механизму. Самодиффузия обеспечивается градиентом химического потенциала приведенных элементов. Эффект самодиффузии хрома заметно проявляется от 530 °С, а молибдена от 540 °С. Заметим, что коэффициенты самодиффузии хрома и молибдена являются переменными и зависят от их химических свойств, а также от условий ползучести.

Скачки атомов хрома и молибдена в вакансии (гантельный механизм диффузии) происходят с различной интенсивностью, что связано с их коэффициентами самодиффузии  $D_{\text{Cr}}$  и  $D_{\text{Mo}}$ , которые определяли путем выявления уровня хрома и молибдена в сегрегациях [3]. Самодиффузию пред-

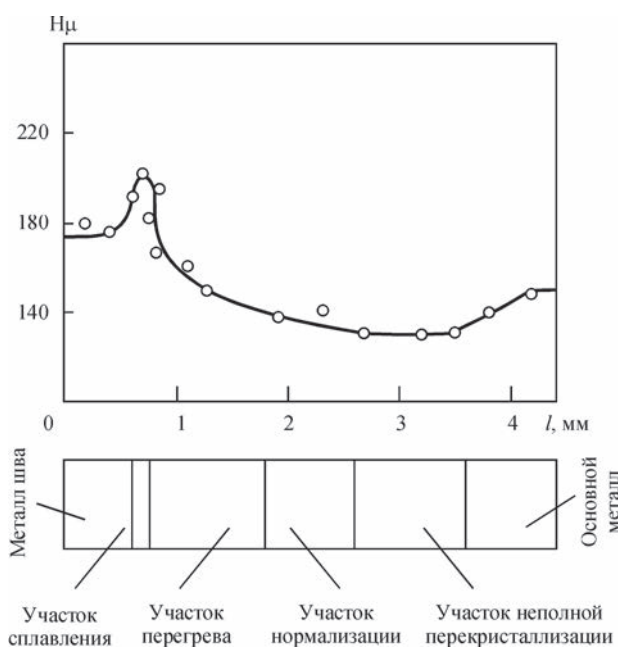


Рис. 2. Микротвердость сварных соединений из стали 15X1M1Ф (ресурс 280 тыс. ч)

ставим как совокупность потоков атомов хрома  $I_{Cr}$ , молибдена  $I_{Mo}$ , а также ванадия  $I_V$ .

В металле рассматриваемых сварных соединений, применительно к их наработке свыше 270 тыс. ч, пластическая деформация превышает 0,3 %, что характерно для логарифмической ползучести. Требуется изучения особенность перехода металла сварных соединений от второй к третьей стадии ползучести. Следуя Андраде [4], описывающему деформацию во времени  $t$  по параболическому закону, запишем выражение для определения деформации металла сварных соединений  $\epsilon$ , после их наработки свыше 270 тыс. ч.

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \beta t^{1/3}) \exp(k't),$$

где множитель  $\exp(k't)$  отражает вклад установившейся ползучести, вызванный пластической деформацией. Величина  $\beta$  зависит от напряжения и температуры, учитывает их превышение и изменение (аварийные сбросы пара, пуски-остановы).  $\epsilon_0$  — деформация металла сварных соединений до 270 тыс. ч их наработки, составляющая, например, для металла шва 0,5 %.

Допускали, что уровень деформации в субзерне может зависеть от плотности дислокаций, которые примыкают к субзерну. Установили, что уменьшение плотности дислокаций приводит к уменьшению уровня напряжений в субзерне. Соответственно, при увеличении плотности дислокаций увеличивается уровень напряжений  $\sqrt{n\sigma_1}$ . На второй стадии ползучести, при наличии самодиффузии хрома и молибдена, из центральных зон зерен  $\alpha$ -фазы в их приграничные зоны перемещение дислокаций будет происходить ускоренно, при постоянных рабочих параметрах, напряжении и температуре.

Разупрочнение металла участков ЗТВ сварных соединений паропроводов при их наработке в условиях ползучести 280...290 тыс. ч составляет около 5...8 % [1–8]. Соответственно, разупрочнение участка неполной перекристаллизации ЗТВ составляет примерно 10...15 % (рис. 2). Заметим, что разупрочнение при наработке сварных соединений свыше 280 тыс. ч происходит с некото-

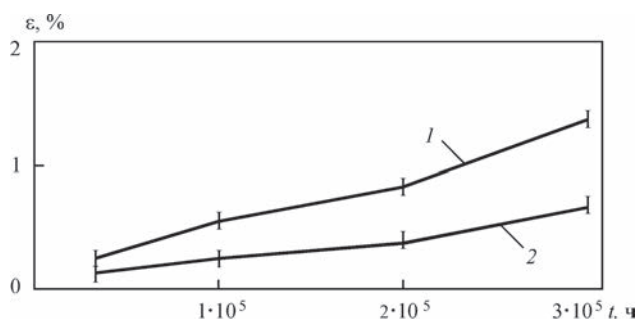


Рис. 3. Зависимость деформации  $\epsilon$  от длительности наработки сварных соединений из стали 15Х1М1Ф: 1 — металл участка перегрева; 2 — основной металл (исходная структура бейнит 75 %, остальное феррит)

рым ускорением. Характер деформации металла участков ЗТВ, после наработки 270 тыс. ч, может быть линейным [5, 6] или отличаться от линейного (рис. 3), что зависит от их структурного состояния и требует уточнения.

В кристаллах  $\alpha$ -фазы (структура паропровода) в процессе возврата движение дислокаций происходит соответственно направлениям диагоналей  $\langle \Pi \rangle$ , преимущественно по совокупности додекаэдрических плоскостей  $\{ \Pi 0 \}$ . Однако (в меньшей мере), скольжение происходит и по совокупности плоскостей  $\{ \Pi 2 \}$ , а также  $\{ 123 \}$ . Следует выявить главные комбинации движения дислокаций в кристаллах  $\alpha$ -фазы из 48 возможных систем скольжения для уменьшения их скорости. Установили, что характерной особенностью дислокационного образования в кристаллах являются короткие и средние дислокации с наличием ступенек. Дислокации одной системы, путем взаимодействия с дислокациями других систем, образуют петли (рис. 4). Совокупность петель представляется в виде сетки дислокаций (рис. 5). Распределение дислокаций в кристалле  $\alpha$ -фазы, при деформации металла 0,5...8,0 %, является неравномерным. В процессе ползучести дислокации, перемещающиеся по направлениям  $\langle \Pi \rangle$  и плоскостям  $\{ \Pi 2 \}$ , ассоциируют, что приводит к образованию соответствующих по размеру ячеек (рис. 6). Рассматриваемая структура характеризуется наличием «стенок», разделяющих участки с высокой плотностью дислокаций  $10^6 \text{ см}^{-2}$  с участками, где плотность дислокаций является относительно низкой и составляет  $10^5 \text{ см}^{-2}$ . Структурное состояние зависит от

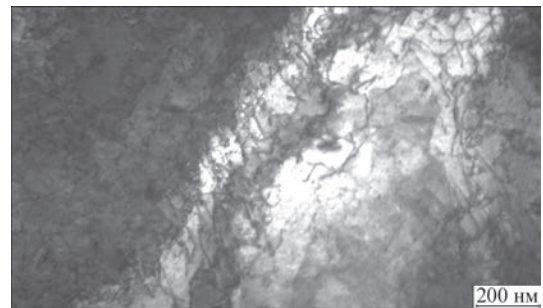


Рис. 4. Микроструктура участка перегрева ЗТВ сварного соединения из стали 12Х1МФ (ресурс 276 тыс. ч.,  $\epsilon = 3 \%$ )

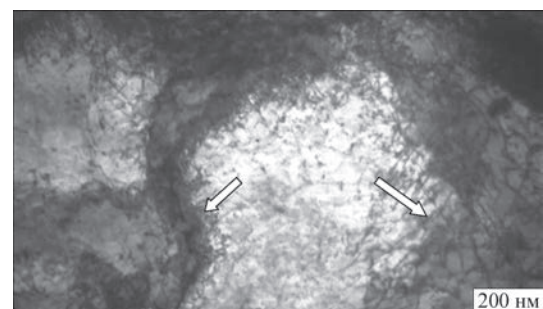


Рис. 5. Дислокационная структура металла шва (сплав 10ХМФ). Сетка дислокаций на отдельных фрагментах субзерен  $\alpha$ -фазы (показано стрелками),  $\epsilon = 3 \%$



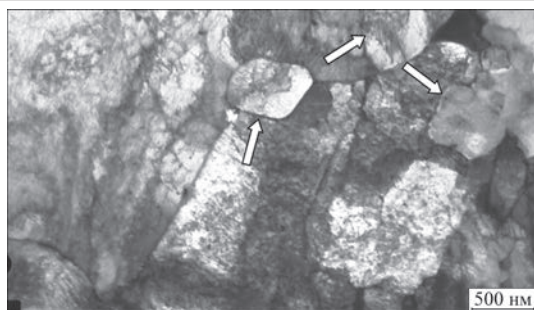


Рис. 6. Структура кристалла  $\alpha$ -фазы участка перегрева ЗТВ сварного соединения из стали 12Х1МФ. Отмечаются различные по размерам ячейки (стрелки) (ресурс 276 тыс. ч.,  $\epsilon = 7\%$ )

нормированной энергии дефектов упаковки и уровня деформации [9, 10]. При увеличении наработки сварных соединений нормированная энергия дефектов упаковки увеличивается, а количество внутренних дислокаций в кристалле  $\alpha$ -фазы уменьшается. При увеличении степени деформации средние размеры ячеек уменьшаются, а различие в ориентации между соседними ячейками увеличивается.

При наработке в условиях ползучести сварных соединений тройников паропроводов свыше 270 тыс. ч на участке неполной перекристаллизации ЗТВ могут образовываться структуры, близкие к глобулярным (рис. 6). Такие структуры представляют собой участки перегибов на дислокациях и характеризуются наличием деформационной неоднородности, а также содержат ячейки с отличающейся ориентацией. Движение дислокаций по одной из возможных плоскостей скольжения тормозится вновь образующимися дислокациями, движущимися в другой системе, которая ее пересекает, что приводит к их общему торможению движения. Наличие вторых фаз также существенно тормозит перемещение дислокаций, движущихся по возможным системам, что в значительной мере зависит от их формы и равномерного распределения. Скорость перемещения дислокаций в структуре сварных соединений является переменной и зависит от особенностей диффузионного перемещения хрома и молибдена, что целесообразно изучать с учетом образования их сегрегаций; от перехода хрома и молибдена из зерен  $\alpha$ -фазы в карбиды. При этом характер деформации основного металла и металла шва является близким к линейному [5].

Допускали, что изменение количества дислокаций в кристалле  $\alpha$ -фазы приводит к соответствующему изменению в нем напряжения  $\sqrt{n\sigma_1}$ . Для приведения в действие источников дислокаций, как существующих, так и новых, в установившихся условиях ползучести приращение внешнего дополнительного напряжения не требуется. Имеет место снижение уровня торможения дислокаций. Перегревы структуры (аварийный сброс пара) не

учитывали. Изменение напряжения, при котором приводятся в действие источники новых дислокаций, составляет  $\Delta\sigma = \sqrt{n\sigma_1}$ , где  $n$  — количество дислокаций в кристалле. Уменьшение плотности дислокаций в центральном участке кристалла  $\alpha$ -фазы, например, до  $10^4 \text{ см}^{-2}$  способствует снижению в нем уровня напряжений  $\sigma_1$ . Увеличение деформационного упрочнения металла сварных соединений не происходит.

Линейный характер деформации, соответствующий наработке сварных соединений примерно до 270 тыс. ч, подтверждает, что дислокации перемещаются переползанием и скольжением со скоростью, близкой к линейной.

Принимая частоту действия источников дислокаций  $v/n$ , запишем выражение для определения скорости деформации металла сварных соединений [4]:

$$\dot{\epsilon} = A \frac{v}{n} = A v \left( \frac{\sigma_1}{X\epsilon} \right)^2,$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от структурного состояния;  $X$  — коэффициент разупрочнения;  $n$  — количество перемещений дислокаций.

Учитывая изменяющееся во времени количество источников дислокаций в кристалле, в выражение Мота внесем соответствующее уточнение. Представим:

$$A = (N_1 + N_2) K^2 b^2 v,$$

где  $N_1$  — существующие источники дислокаций;  $N_2$  — новые источники дислокаций;  $L$  — путь перемещения дислокаций;  $b$  — вектор Бюргерса.

Можно показать, что в сварных соединениях из рассматриваемых сталей неуставившаяся стадия ползучести соответствует примерно 50 тыс. ч их наработки.

Применительно к рассматриваемым сварным соединениям запишем уточненное выражение Дорна [9], которое обеспечило построение кривой ползучести (рис. 7):

$$\epsilon = \epsilon_{\text{уст}} - \epsilon_0 = f(\dot{\epsilon}_{\text{уст}} t) = f \left[ \left( \frac{\sigma}{G} \right)^n \frac{D_m G b}{RT} t \right],$$

где  $D_m(m_1 m_2)$  — соответственно, коэффициент диффузии хрома и молибдена;  $n$  — показатель чувствительности скорости установившейся ползучести к напряжению;  $G$  — модуль сдвига;  $\epsilon_0$  — деформация на неуставившейся стадии ползучести;  $\dot{\epsilon}_{\text{уст}}$  — деформация на установившейся стадии ползучести.

Заметим, что кривые ползучести для участков ЗТВ, а также металла шва и основного металла следует строить отдельно.

Для металла паропроводов, из сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ предел ползучести равен 1% [7]. Металл участков ЗТВ при наработке свар-

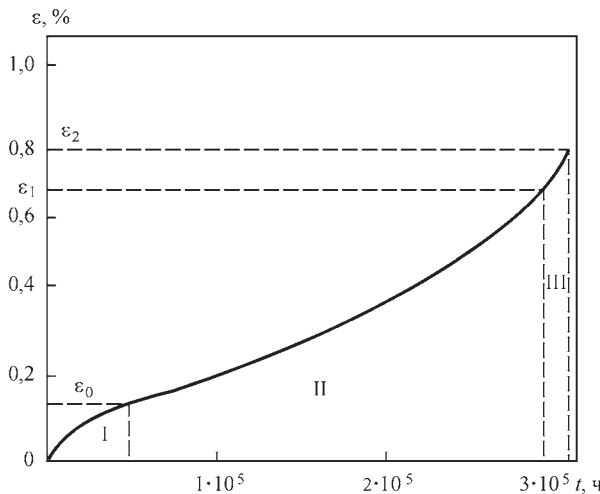


Рис. 7. Кривая ползучести металла шва (сплав 10ХМФ):  $\varepsilon_0$  — деформация, соответствующая наработке сварного соединения 50 тыс. ч; I–III — участки, соответствующие стадиям ползучести

ных соединений 250...270 тыс. ч деформируется примерно от 0,7 до 7 % [5, 7]. Установили, что деформация металла сварных соединений преимущественно накапливается на второй стадии ползучести (рис. 7) [7].

При наличии уровня рабочих напряжений и температур ( $T_s = 545...585$  °С,  $P_s = 25$  МПа) деформация ползучести обеспечивается переползанием дислокаций. Подтверждается предположение Виртмана, что ползучесть контролируется способностью краевых дислокаций обходить препятствия путем переползания. При установленном значении  $A$  и  $n \approx 5$  дислокационную модель ползучести, предусматривающую переползание краевых дислокаций, можно описать уточненным уравнением Виртмана [10]:  $\varepsilon_{уст} = (AD_m Gb / RT(\sigma/G))^5$ .

Установили, что механизм деформации металла сварных соединений паропроводов зависит от термически активируемого процесса переползания дислокаций. Повышение сопротивления ползучести в процессе возврата представляется возможным путем одновременной реализации рассмотренных механизмов торможения движения дислокаций. Изучение особенностей возврата послужит основой для изучения кинетики рекристаллизации, имеющей место при наработке паропроводов свыше 290...300 тыс. ч.

## Выводы

1. Установили, что деформационные и диффузионные процессы как составляющие механизма возврата обеспечивают разупрочнение металла длительно эксплуатируемых в условиях ползучести сварных соединений паропроводов.

2. Выявили, что разупрочнение участков металла ЗТВ, а также металла шва и основного металла сварных соединений паропроводов, при их

наработке свыше 270 тыс. ч составляет 5...8 %, что зависит от их структурного состояния, а также от деформационных и диффузионных процессов.

## Список литературы

1. Дмитрик В. В., Соболев О. В., Погребной М. А., Сыренко Т. А. (2015) Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов. *Автоматическая сварка*, 7, 12–17.
2. Дмитрик В. В. (2000). Моделирование структуры сварных соединений теплоустойчивых перлитных сталей. *Там же*, 4, 27–30.
3. Дмитрик В. В., Сыренко Т. А. (2012) К механизму диффузии хрома и молибдена в металле сварных соединений паропроводов. *Там же*, 0, 22–26.
4. Розенберг В. М. (1973) *Основы жаропрочности металлических материалов*. Москва, Металлургия.
5. Дмитрик В. В., Глушко А. В., Сыренко Т. А. (2017) Структурні зміни в металі зварних з'єднань паропроводів після тривалої експлуатації. *Автоматическая сварка*, 7, 19–23.
6. Дмитрик В. В., Глушко А. В., Григоренко С. Г. (2016) Особенности порообразования в сварных соединениях паропроводов в условиях длительной эксплуатации. *Там же*, 9, 56–60.
7. Хромченко Ф. А. (2003) *Ресурс сварных соединений паропроводов*. Москва, Машиностроение.
8. Glushko A. (2016) Research into defectiveness of welded joints of steam pipes operated over a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 1(84), 14–20.
9. Gottstein G., Shvindlerman L. S. (1999) *Grain Boundary Migration in Metals: Thermodynamics, Kinetics, Applications*. New York, CRC Press.
10. Humphreys F. J., Hatherly M. (1995) *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Oxford, Pergamon Press.

## References

1. Dmitrik, V.V., Sobol, O.V., Pogrebnoj, M.A. et al. (2015) Peculiarities of degradation of metal in welded joints of steam pipelines. *The Paton Welding J.*, 7, 10-15.
2. Dmitrik, V.V. (2000) Structure of welded joints from low-alloyed heat-resistant Cr-Mo-V pearlitic steels. *Ibid.*, 4, 26-29.
3. Dmitrik, V.V., Syrenko, T.A. (2012) To the mechanism of diffusion of chromium and molybdenum in the metal of welded joints of steam pipelines. *Ibid.*, 0, 20-24.
4. Rozenberg, V.M. (1973) *Principles of high-temperature strength*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Dmitrik, V.V., Glushko, A.V., Syrenko, T.A. (2017) Structural changes in metal of welded joints after long-term service. *The Paton Welding J.*, 7, 15-18.
6. Dmitrik, V.V., Glushko, A.V., Grigorenko, S.G. (2016) Features of pore formation in welded joints of steam lines in long-term operation. *Ibid.*, 9, 51-54.
7. Khromchenko, F.A. (2003) *Service life of welded joints of steam pipelines*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Glushko, A. (2016) Research into defectiveness of welded joints of steam pipes operated over a long time. *Eastern-Europ. J. of Enterprise Technologies*, 6, 1(84), 14-20.
9. Gottstein, G., Shvindlerman, L.S. (1999) *Grain boundary migration in metals: Thermodynamics, kinetics, applications*. New York, CRC Press.
10. Humphreys, F.J., Hatherly, M. (1995) *Recrystallization and related annealing phenomena*. Oxford, Pergamon Press.

В. В. Дмитрик<sup>1</sup>, А. В. Глушко<sup>1</sup>,  
Т. А. Сыренко<sup>2</sup>, С. Г. Григоренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НТУ «ХП». 61002, м. Харків, ул. Кирпичова, 2.

E-mail: svarka126@ukr.net

<sup>2</sup>Харківський машинобудівний коледж.  
61068, г. Харків, ул. Плеханівська, 79



<sup>3</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

# ОСОБЛИВОСТІ ЗНЕМІЦНЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ПАРОПРОВОДІВ

Прояв повернення в металі зварних з'єднань паропроводів із теплостійких перлітних сталей, які тривалий час експлуатуються в умовах повзучості, характеризується певними структурними змінами. Такі зміни забезпечують знеміцнення металу зварних з'єднань. У роботі розглянуто особливості структурних і деформаційних змін, а також прояв дифузії, що відбуваються в процесі повернення і призводять до знеміцнення металу зварних з'єднань паропроводів при їх напрацюванні понад 270 тис. год. Бібліогр. 10, рис. 7.

*Ключові слова:* зварні з'єднання паропроводів, повернення, структурний стан, знеміцнення, дислокації, дифузія, зона термічного впливу

V.V. Dmitrik<sup>1</sup>, A.V. Glushko<sup>1</sup>, T.A. Syrenko<sup>2</sup>, S.G. Hryhorenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NTU «KhPI». 2 Kirpicheva Str., 61002, Kharkov, Ukraine.  
E-mail: svarka126@ukr.net

<sup>2</sup>Kharkov Machine Building College.

79 Plekhanovskaya Str., 61068, Kharkov, Ukraine.

<sup>3</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

# FEATURES OF EMBRITTLEMENT OF WELDED JOINTS OF OPERATED STEAM PIPELINES

The development of recovery in the metal of welded joints of steam pipelines of heat-resistant pearlitic steels, which are long operated in the creep conditions, is characterized by certain structural changes. Such changes provide embrittlement in the metal of welded joints. The article considers the features of structural and deformational changes, as well as the development of diffusion which occur in the process of recovery and leads to embrittlement in the metal of welded joints of steam pipelines, at their service of over 270 hors. h. 1 Ref., 7 Fig.

*Keywords:* welded joints of steam pipelines, recovery, structural state, embrittlement, dislocations, diffusion, heat-affected zone

Поступила в редакцію 15.03.2018



16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre  
**expoSilesia**  
www.exposilesia.pl

**60<sup>th</sup>**  
International  
Welding Conference  
Organizer:  
Institute of Welding

**ExpoWELDING**

**International Welding Fair**

ul. Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec | expowelding@exposilesia.pl



Міжнародна Асоціація «Сварка» (г. Київ) організує участь українських компаній на колективному стенді в міжнародній сварочній виставці «ExpoWELDING 2018», г. Сосновець, Польща, 16-18 листопада 2018 г. Виставка проводиться один раз в два роки і є найбільшою сварочною виставкою в Східній Європі. По питаннях участі в виставці «ExpoWELDING 2018» на колективному стенді просьба звертатися: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Стаття, присвячена попередній виставці «ExpoWELDING 2016» і участю в ній українських компаній на колективному стенді, була опублікована в журналі «Автоматична сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 і знаходиться в відкритому доступі за посиланням: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.



## СВОЙСТВА СТАЛЕМЕДНОГО БИМЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННОГО НАПАЙКОЙ В АВТОНОМНОМ ВАКУУМЕ

**И. П. СЕРЕБРЯНИК, М. Г. АТРОШЕНКО, М. А. ПОЛЕЩУК, А. Л. ПУЗРИН, А. В. ШЕВЦОВ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определено, что при напайке меди на сталь в условиях автономного вакуума в зоне контакта образуется участок повышенной микротвердости, которая устраняется стандартной для стали термической обработкой. Показано, что содержание углерода в стали не оказывает существенного влияния на свойства переходной зоны медь–сталь. Установлено, что в условиях напайки в автономном вакууме взаимодействие жидкой меди со сталью не приводит к образованию трещин в зоне соединения. Определено, что увеличение времени контакта жидкой меди со сталью приводит к образованию хрупких структур, что снижает ударную вязкость соединения. При испытаниях на статическое растяжение разрушение сталемедного соединения происходит по медной части. При этом прочностные свойства напаянного слоя превышают справочные данные для деформированной и отожженной меди. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 9.

*Ключевые слова:* напайка меди на сталь в автономном вакууме, сталемедный биметалл, структура и свойства переходной зоны

Сталемедные детали, сочетающие прочность стального слоя и высокую тепло- и электропроводность меди, находят широкое применение в металлургии, судостроении, машиностроении и других отраслях промышленности. Это, к примеру, крупногабаритные подшипники скольжения валов рудоразмольных мельниц, подовые электроды дуговых печей постоянного тока, элементы кристаллизаторов металлургических печей. Во многих промышленных установках для подвода электротока в тысячу и более ампер используются биметаллические сталемедные шины, которые сочетают конструкционную прочность стали и высокую электропроводность меди.

В зависимости от назначения биметаллические детали изготавливаются в широком диапазоне толщин как плакирующего, так и основного слоя. В соответствии с этим применяются разнообразные способы соединения меди со сталью: сварка взрывом, диффузионная сварка, электрошлаковая наплавка, дуговая и индукционная наплавки, заливка и совместная прокатка.

В последнее время разработан способ изготовления биметаллических деталей такого типа путем напайки меди на сталь в условиях автономного вакуума, отличающийся высоким качеством соединения и не требующий применения специального оборудования [1].

Учитывая, что сталемедные детали используются, как правило, в агрегатах с большим энергопотреблением, при повышенных температурах, в условиях постоянных теплосмен, состав и свойства переходной зоны медь–сталь могут быть определяющими для работоспособности детали и узла в целом.

При различных способах дуговой наплавки меди на сталь в зоне соединения могут возникать

микротрещины, которые обусловлены высокой температурой столба электрической или плазменной дуги, а также совместной кристаллизацией медно-стальной жидкой фазы [2–5].

Напайка меди на сталь в условиях автономного вакуума осуществляется при относительно низкой температуре, не превышающей 1150 °С, а при образовании соединения в жидкой фазе находится только медь. Это позволяет получить высококачественное биметаллическое соединение [1].

В биметаллических деталях в качестве прочного слоя наиболее часто применяются конструкционные стали, которые по содержанию основных компонентов близки друг к другу и существенно отличаются только содержанием углерода. Поэтому с целью рационального проектирования технологического процесса напайки меди на стали проведена оценка влияния содержания углерода в сталях на структуру и свойства сталемедной переходной зоны. Для экспериментов выбрали электротехническую сталь, сталь 20 и сталь 45 [6] с содержанием углерода 0,03, 0,19 и 0,42 %, соответственно.

Исследования проводили на образцах, представленных на рис. 1.

В стальных корпусах диаметром 42 мм, изготовленных из соответствующей стали, выполнена проточка глубиной 4 мм, в которую вкладывали медный диск толщиной 3 мм. Образцы помещали в герметичный контейнер, который после вакуумирования нагревали в печи до температуры 1150 °С с изотермической выдержкой 30 мин. Для проведения металлографических исследований сталемедной переходной зоны из половинок образцов после напайки и охлаждения изготови-

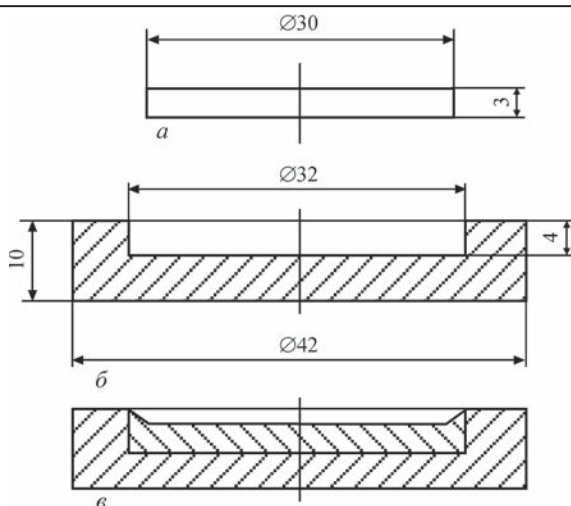


Рис. 1. Образец для исследования взаимодействия расплава меди со сталью: а — диск из меди; б — стальной корпус; в — сечение образца после затвердевания меди

ливали микрошлифы. На рис. 2 представлены микроструктуры переходных зон, полученных при напайке меди на электротехническую сталь (рис. 2, а), сталь 20 (рис. 2, б) и сталь 45 (рис. 2, в).

Как видно, в зоне сплавления во всех случаях в меди наблюдаются стальные включения. С увеличением содержания углерода в стали количество таких включений уменьшается, а значит, уменьшается проникновение меди по границам зерен основного металла. Расплав меди, проникая

в сталь по границам зерен, охватывает и отрывает их (рис. 3).

Дальнейшее растворение продолжается в расплаве меди. Дендритная основа стального кристаллита имеет, вероятно, наименьшую растворимость в жидкой меди, поэтому дендриты располагаются после кристаллизации в медном слое (рис. 4).

На границе сталь–медь процесс проникновения меди и отрыва стальных зерен с течением времени повторяется снова и зона сплавления перемещается в сторону стали.

Существует мнение, что сталь растрескивается под действием медного расплава, который затем заполняет трещины [2–5]. Если такой процесс имеет место, то должен существовать остроугольный участок в вершине трещины, который будет таким узким, что из условий капиллярности жидкая медь не сможет его заполнить, и он останется пустым. Наличие таких дефектов существенно снизит работоспособность соединения при знакопеременных нагрузках. Для проверки этого предположения (вида вершины меди, проникшей в сталь) образцы, полученные напайкой в условиях автономного вакуума, рассмотрели под электронным микроскопом при увеличении  $\times 3000$  (рис. 5).

Вершины меди, проникшей в сталь, имеют плавную криволинейную конфигурацию. Пустот



Рис. 2. Микроструктура ( $\times 115$ ) металла зоны соединения медь–сталь: а — электротехническая сталь; б — сталь 20; в — сталь 45

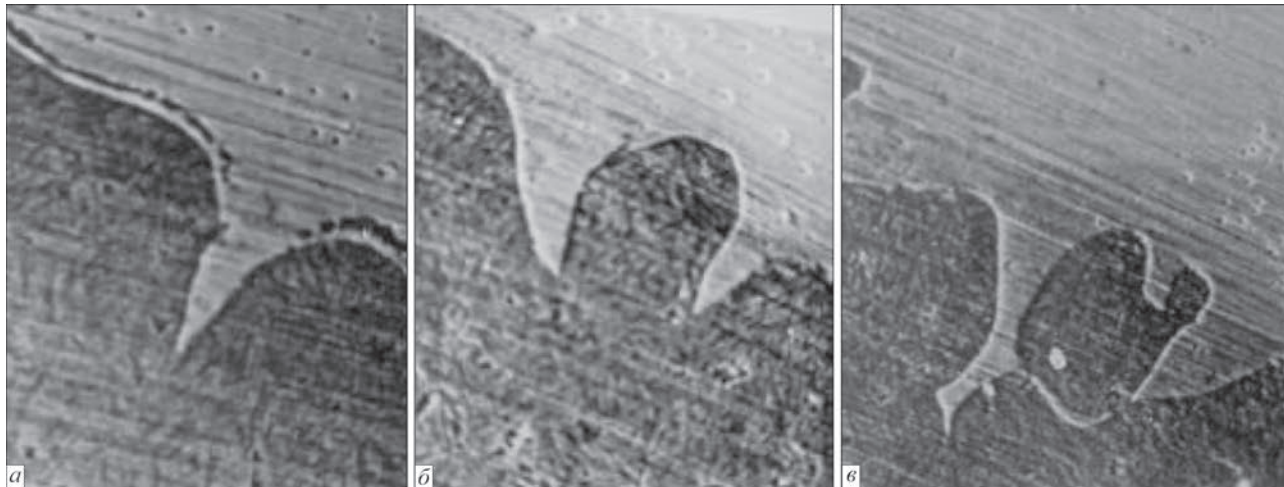


Рис. 3. Этапы отделения частиц стали расплавом меди: а — одиночное проникновение; б — двухстороннее проникновение; в — завершение отрыва стальной частицы

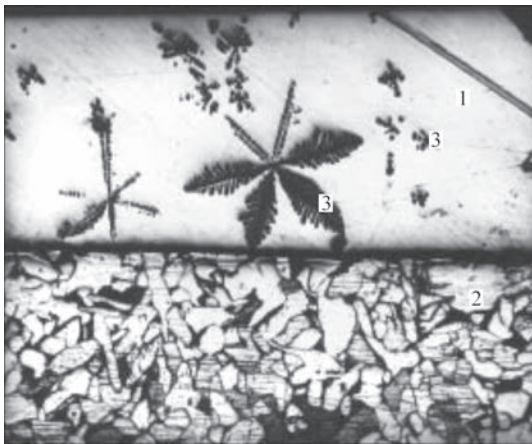


Рис. 4. Стальные дендриты в медном слое: 1 — медь; 2 — сталь; 3 — стальные дендриты

нет. Таким образом, гипотеза о растрескивании стали в контакте с жидкой медью в наших экспериментах не нашла подтверждения.

Замеры микротвердости сталемедной переходной зоны выполняли на приборе ПМТ-3. Результаты замеров приведены в табл. 1. У линии сплавления, со стороны стали наблюдается зона повышенной микротвердости. Для электротехнической стали ее протяженность составляет около 80 мкм, для стали 20 около 50 мкм, для стали 45 около 25 мкм. Такая зона в процессе эксплуатации может вызвать появление дополнительных напряжений и снизить работоспособность соединения.

Для устранения этого явления образцы были подвергнуты термической обработке по стандартному режиму нормализации для соответствующей марки конструкционной стали.

Исследование микрошлифов после термической обработки показало, что микротвердость переходной зоны удалось существенно снизить (см. табл. 1).

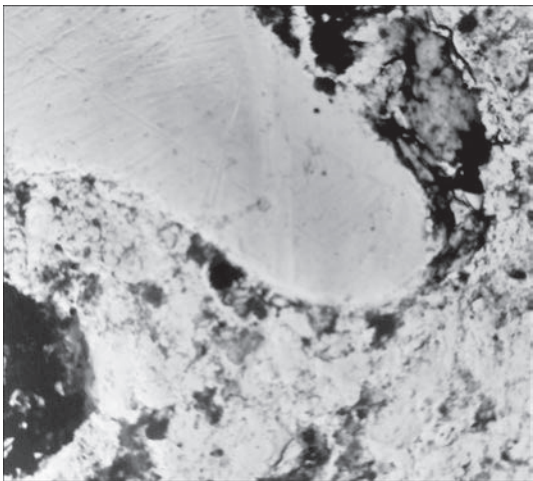


Рис. 5. Микроструктура (×3000) зоны соединения при напайке в автономном вакууме меди М1 на сталь 20 ( $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , изотермическая выдержка 30 мин)

Как было приведено выше, зона сплавления в результате взаимодействия жидкой меди со сталью смещается в сторону стали.

Для оценки величины этого перемещения при изготовлении образцов (см. рис. 1) фиксировали фактическую глубину проточки с помощью индикаторного глубиномера. После напайки на отшлифованный торец половинки образца прибором ПМТ-3 наносили точку на расстоянии 3,5 мм от верхнего края образца. Расстояние от контрольной точки до видимой границы сплавления определяли в процессе замера микротвердости. В результате замеров установлено, что перемещение линии сплавления составило 220...240 мкм для электротехнической стали, 165...215 мкм для стали 20 и 150...180 мкм для стали 45. Такую разницу величин перемещения линии сплавления для сталей с различным содержанием углерода при взаимодействии жидкой меди со сталью в течение 30 мин следует признать незначительной и можно не учи-

Таблица 1. Микротвердость металла переходной зоны соединения, полученного автовакуумной напайкой, до и после термообработки

Состав соединения	Расстояние от линии сплавления, мкм							
	Медь							
	600		50		30		20	
	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о
Эл. тех. сталь+М1	92	79	93	78	97	66	95	76
сталь 20 + М1	113	87	113	89	115	78	105	92
сталь 45 + М1	93	81	108	81	107	68	116	79

Продолжение табл. 1

Состав соединения	Расстояние от линии сплавления, мкм											
	Сталь											
	10		20		30		50		100		1000	
	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о
Эл. тех. сталь+М1	255	116	252	141	237	122	233	114	164	132	153	136
сталь 20 + М1	270	129	250	143	247	124	230	148	191	135	190	143
сталь 45 + М1	269	177	261	176	205	170	200	183	213	188	212	182

Примечание. Даны статистически достоверные средние (из 12-21 замеров) значения микротвердости.



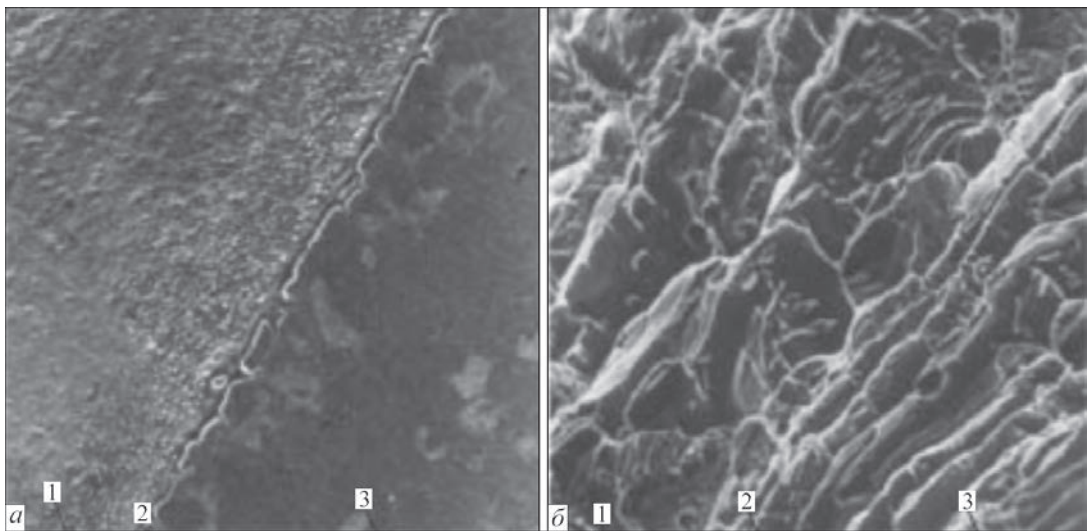


Рис. 6. Переходная зона сталемедного соединения, полученного автовакуумной напайкой при  $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  и изотермической выдержке 30 мин: *a* — микроструктура ( $\times 130$ ); *б* — фрактограмма излома ( $\times 3000$ ); 1 — медь; 2 — зона сплавления; 3 — сталь

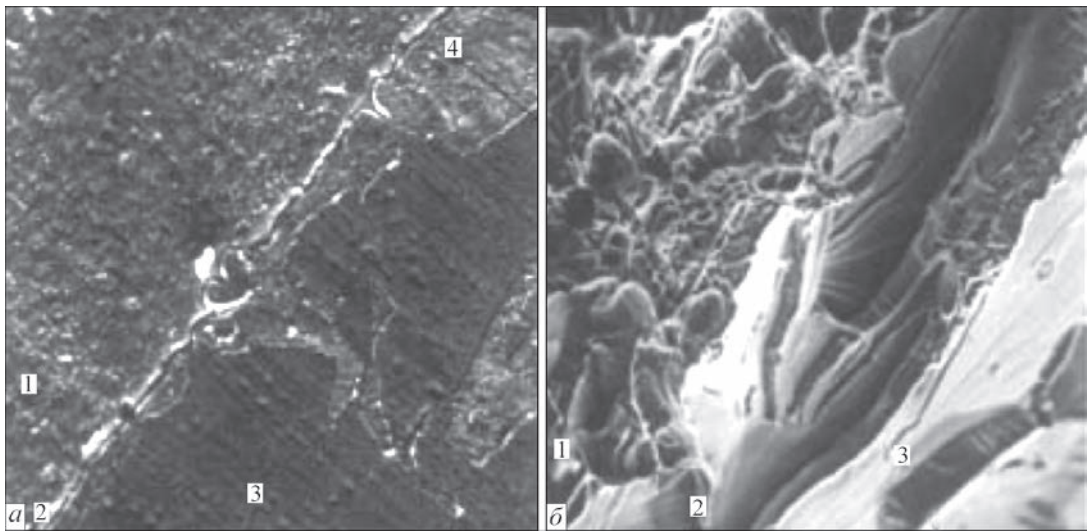


Рис. 7. Переходная зона сталемедного соединения полученного автовакуумной напайкой при  $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  и изотермической выдержке 2 ч: *a* — микроструктура ( $\times 130$ ); *б* — фрактограмма излома ( $\times 3000$ ); 1 — медь; 2 — зона сплавления; 3 — сталь; 4 — цепочка зерен перлита в стали

тывать при проектировании технологических процессов напайки меди на сталь.

С целью определения оптимального времени контакта жидкой меди со сталью методом автовакуумной напайки изготовили два образца из стали 20 размером  $150\times 100\times 50\text{ мм}$  с толщиной медного слоя 10 мм. При этом время контакта жидкой меди со сталью при температуре  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  составило на одном образце 0,5 и 2,0 ч на другом. После напайки провели термообработку — нормализацию по стандартному для стали 20 режиму. Из полученных соединений изготовили образцы для ис-

пытания на ударный изгиб с острым надрезом [7] таким образом, чтобы плоскость разрушения проходила поперек зоны соединения. Образцы имели размеры  $10\times 10\times 55\text{ мм}$ ; толщина стали 6 мм; толщина меди 4 мм; глубина надреза, проходящего через оба слоя, 2 мм.

Среднее значение ударной вязкости по результатам испытаний трех образцов составило  $15,7\text{ мДж/м}^2$  для времени выдержки 0,5 ч и  $13,2\text{ мДж/м}^2$  для 2,0 ч. Из половинок образцов после испытания изготавливали шлифы для фрактотографических и металлографических исследо-

Т а б л и ц а 2. Механические свойства сталемедных образцов

Объект и метод исследований	Механические свойства		
	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi$ , %
Испытания сталемедных образцов (зона сплавления) на статическое растяжение	$\frac{112,6...127,2}{118,1^*}$	$\frac{281,2...282,9}{282,4^*}$	$\frac{71,1...73,8}{72,1^*}$
Медь деформированная и отоженная (стандартные значения)	74,0	216,0	75,0

\* Среднее значение по результатам испытаний шести образцов.



Рис. 8. Темплет сталемедной плиты (толщина медного слоя 40 мм)

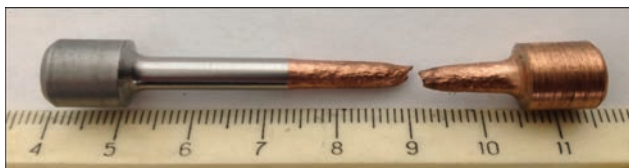


Рис. 9. Образец после испытания на статическое растяжение. На микрошлифах образцов с меньшим временем выдержки в медном слое имеются мелкодисперсные включения. Сталь состоит из массива феррита, в котором равномерно располагаются зерна перлита небольшого размера. На изломах образцов этой серии разрушение меди и стали носит вязкий характер (рис. 6).

Ступеньки скола параллельны друг другу. Это свидетельствует о том, что фронт разрушения продвигался равномерно. У образцов с большим временем выдержки медь насыщена как мелкодисперсными, так и крупными включениями (рис. 7).

Со стороны стали вдоль линии сплавления располагается непрерывная цепочка крупных зерен перлита. Разрушение меди носит вязкий характер. В то же время разрушение стали хрупкое, внутризеренное. Направление ручьев свидетельствует о том, что разрушение начиналось от структурных составляющих, расположенных на линии сплавления. Можно с достаточной уверенностью предположить, что источником разрушения послужили зерна перлита. Такой характер разрушения может отрицательно повлиять на работоспособность соединения и поэтому время контакта жидкой меди со сталью должно быть, по возможности, сокращено.

На основании проведенных исследований были выбраны оптимальные параметры технологического процесса и выполнена автовакуумная напайка плиты из стали 20 размером 400×500×50 мм медью М1. Толщина слоя меди составила 40 мм (рис. 8).

Из плиты изготовлены образцы для испытания на статическое растяжение длиной 40 мм таким образом, чтобы линия сплавления меди со сталью располагалась в середине рабочей части образца. При испытаниях разрушение проходило по меди (рис. 9).

Это свидетельствует о том, что прочность контакта медь–сталь выше, чем прочность меди на растяжение. Результаты механических испытаний приведены в табл. 2.

Таким образом, механические свойства испытанных образцов выше, чем у деформированной и отожженной меди по справочным данным.

## Выводы

В результате проведенной работы опытным путем установлено, что метод напайки в автономном вакууме обеспечивает высококачественное соединение меди со сталями с различным содержанием углерода и может быть рекомендован для производства сталемедных изделий и биметаллических заготовок.

## Список литературы

1. Атрошенко М. Г., Полешчук М. А., Шевцов А. В. и др. (2015) Физико-механические свойства переходной зоны биметалла, полученного автономной вакуумной напайкой меди на сталь. *Автоматическая сварка*, **11**, 61–65.
2. Вайнерман А. Е. (1981) Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Там же*, **6**, 22–26.
3. Аснис А. Е., Прохоренко В. М., Швиндлерман Л. С. (1965) О механизме образования трещин при сварке и наплавке меди на сталь. *Сварочное производство*, **11**, 8–9.
4. Гринь А. Г., Жариков С. В., Залесный Д. И. (2016) Совершенствование самозащитной порошковой проволоки для сварки меди со сталью. *Вестник государственной машиностроительной академии*, **2**(16), 90–95.
5. Magnabosco I., Ferro P., Bonollo F., Arnberg L. (2006) An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper – stainless steel. *Materials Science and Engineering*, **A 424**, 163–173.
6. (2013) ГОСТ 1050-2013. *Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия*.
7. (1985) ГОСТ 10885-85. *Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионноустойчивая. Технические условия*.

## References

1. Atroshenko, M.G., Poleshchuk, M.A., Shevtsov, A.V. et al. (2015) Physical and mechanical properties of transition zone of bimetal produced by autonomous vacuum brazing of copper on steel. *The Paton Welding J.*, **11**, 52-56.
2. Vajnerman, A.E. (1981) Mechanism of intercrystalline penetration in surfacing of copper alloys on steel. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 22-26 [in Russian].
3. Asnis, A.E., Prokhorenko, V.M., Shvindlerman, L.S. (1965) About mechanism of crack formation in welding and surfacing of copper on steel. *Svaroch. Proizvodstvo*, **11**, 8-9 [in Russian].
4. Grin, A.G., Zharikov, S.V., Zalesny, D.I. (2016) Improvement of self-shielding flux-cored wire for welding of copper with steel. *Vestnik Gos. Mashinostroit. Akademii*, **2**(16), 90-95 [in Russian].
5. Magnabosco, I., Ferro, P., Bonollo, F., Arnberg, L. (2006) An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel. *Mater. Sci. & Engin.*, **A 424**, 163-173.
6. GOST 1050-2013: *Metal products from non-alloy structural quality and special steels. General specification* [in Russian].
7. GOST 10885-85: *Sheet hot rolled two-layered corrosion-resistant steel. Specification* [in Russian].

І. П. Серебряник, М. Г. Атрошенко,  
М. А. Полешук, О. Л. Пузрін, О. В. Шевцов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕМІДНОГО БІМЕТАЛУ,  
ОТРИМАНОГО НАПАЙКОЮ  
В АВТОНОМНОМУ ВАКУУМІ

Визначено, що при напайці міді на сталь в умовах автономного вакууму в зоні контакту утворюється ділянка підвищеної мікротвердості, яка усувається стандартною для сталі термічною обробкою. Показано, що вміст вуглецю в сталі не робить істотного впливу на властивості перехідної зони мідь–сталь. Встановлено, що в умовах напайки в автономному вакуумі взаємодія рідкої міді зі сталлю не призводить до утворення тріщин в зоні з'єднання. Визначено, що збільшення часу контакту рідкої міді зі сталлю призводить до утворення крихких структур, що знижує ударну в'язкість з'єднання. При випробуваннях на статичний розтяг руйнування сталемідного з'єднання відбувається по мідній частині. При цьому властивості міцності напаяного шару перевищують довідкові дані для деформованої і відпаленої міді. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 9.

*Ключові слова:* напайка міді на сталь в автономному вакуумі, сталемідний біметал, структура і властивості перехідної зони

I. P. Serebryanik, M. G. Atroshenko, M. A. Poleshchuk,  
A. L. Puzrin and A. V. Shevtsov

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

PROPERTIES OF STEEL-COPPER BIMETAL PRODUCED  
BY BRAZING IN AUTONOMOUS VACUUM

It is determined that brazing of copper on steel under conditions of autonomous vacuum in contact zone promotes formation of an area of increased microhardness, which is eliminated by standard for steel heat treatment. It is shown that content of carbon in steel does not promote significant effect on properties of copper-steel transition zone. It is stated that interaction of liquid copper with steel does not result in formation of cracks in the joint zone under conditions of brazing in autonomous vacuum. It is determined that increase of time of contact of liquid copper with steel results in formation brittle structures that decrease joint impact toughness. Fracture of steel-copper joint takes place along copper in static tensile tests. At that strength properties of brazed layer exceed reference data for deformed and annealed copper. 7 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

*Keywords:* brazing of copper on steel in autonomous vacuum, steel-copper bimetal, structure and properties of transition zone.

Поступила в редакцию 27.03.2018

**Международная научно-техническая конференция  
НОВЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ**  
(к 100-летию Одесского национального политехнического университета)  
26-29 сентября 2018 г. Одесса



ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

Перспективные технологии и производственные процессы будущего.  
Пути экономии материальных ресурсов и энергоресурсов при изготовлении машин.  
Микро- и нанотехнологии в машиностроении.  
Высокоэффективные технологии комбинированной обработки.  
Высокопроизводительные инструменты в металлообработке.  
Современные ресурсосберегающие технологии.  
Пути автоматизации технологических процессов в машиностроении.  
Эколого-энергетические нетрадиционные технологии и их продвижение в технику.  
Методические вопросы высшего образования в области новых технологий.

04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2. АТМ Украины  
Тел. /Факс +38-044-430-85-00, [www.atmu.net.ua](http://www.atmu.net.ua)



# ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА НА СТАЛЬ 110Г13Л

Ю. М. КУСКОВ, Ф. К. БИКТАГИРОВ, Т. И. ГРИЩЕНКО, А. И. ЕВДОКИМОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Представлены результаты металлографического исследования металла опытных наплавов дробью из высокохромистого чугуна в токоподводящем кристаллизаторе образцов из стали 110Г13Л. Показаны возможность получения качественных биметаллических соединений и особенности формирования зоны сплавления металлов при минимальном и максимальном проплавлении основного металла. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, токоподводящий кристаллизатор, наплавочная дробь, высокохромистый чугун, сталь 110Г13Л, структура металла

Для изготовления различных изделий горноталлургического оборудования, подвергающихся абразивному изнашиванию, широкое распространение получила сталь 110Г13Л. Однако если в процессе эксплуатации истирающие усилия небольшие, либо толщина упрочненного слоя соизмерима с абразивным износом, преимущества данной стали не проявляются и она сопротивляется изнашиванию как обычная низколегированная сталь. Поэтому в этом случае для увеличения долговечности изношенных деталей, изготовленных из стали 110Г13Л, желательно не просто восстанавливать их размеры, а заменять изношенную часть материалами повышенной износостойкости. К таким материалам, в частности, относятся высокохромистые (15...30 % Cr) чугуны [1–4]. И хотя они характеризуются не только повышенной сопротивляемостью абразивному изнашиванию, но и достаточно высокими механическими свойствами (таблица), нанесение таких материалов методами дуговой наплавки практически невозможно. Такая задача может быть решена с помощью электрошлаковой наплавки (ЭШН).

Многочисленные работы по созданию оптимальной технологии восстановления деталей из стали 110Г13Л были выполнены в Донецком национальном техническом университете применительно к ЭШН высокохромистым чугуном зубьев ковшей карьерных экскаваторов [5–7]. При этом использовалась классическая схема наплавки размещенной в кристаллизаторе заготовки плавящимся в шлаке электродом. Авторы разработанной технологии ЭШН получили большой опыт эксплуатации наплавленных высокохромистым чугуном изделий и достаточно подробно изучили особенности зоны сплавления стали 110Г13Л и высокохромистого чугуна [8, 9]. По результатам этого опыта и исследований можно сделать следу-

ющие выводы: во-первых, получить качественное биметаллическое соединение стали и чугуна даже при электрошлаковой наплавке достаточно сложная задача; во-вторых, восстановленные по такой технологии изделия желательно эксплуатировать только при отсутствии значительных ударных нагрузок [6, 8].

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона технология электрошлаковой наплавки дискретным материалом в токоподводящем кристаллизаторе (ТПК) имеет определенные преимущества по воздействию на условия сплавления металлов и формирования их кристаллической структуры по сравнению со способами наплавки в обычных кристаллизаторах с использованием плавящихся электродов большого сечения. Эти преимущества определяются возможностью в более широких пределах варьировать технологическими параметрами наплавки, а также процессами инокулирования расплавленного металла (металлической ванны) наплавляемым материалом и вращения металлической ванны, обусловленного конструкцией ТПК [10].

Поэтому целью данной работы было исследование структуры наплавленного высокохромистого чугуна и зоны его сплавления со сталью 110Г13Л при ЭШН в ТПК с использованием в ка-

**Свойства наплавленного и литого высокохромистого чугуна (~3 % C, 16 % Cr)**

Материал	Механические свойства				Твердость HRC
	$\sigma_v$ , МПа	$KCU_{20}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_{изг}$ , МПа	Стрела прогиба, мм	
Чугун наплавленный	820	1,3	1650	2,9	~ 50
Чугун литой	420	-	280	1,7	~ 50

честве наплавочного материала дискретной при-  
садки — чугунной дробь.

Наплавки выполняли в ТПК диаметром 180 мм. Основным металлом служили заготовки из стали 110Г13Л толщиной 40 мм. Дискретной при-  
садкой являлась дробь диаметром 2,5...3,5 мм из высокохромистого чугуна (мас. %: 2,4С; 27Сr), полученная распылением воздухом струи жидкого металла. Производительность наплавки около 30 кг/ч.

Исследовали образцы, вырезанные из биметаллических заготовок, имеющих различную степень проплавления основного металла. Образец № 1 — с минимальным (1...2 мм) проплавлением и образец № 2 — максимальным (5...7 мм) проплавлением. Микроструктуру наплавленного слоя (высокохромистого чугуна) выявляли электролитическим травлением в 20 %-м водном растворе хромового ангидрида при напряжении 15 В в течение 5 с. Микроструктуру основного металла (стали 110Г13Л) выявляли травлением в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Металлографические исследования проводили с помощью микроскопа «Эпиквант». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 100 г. Твердость измеряли на приборе ТК-2М по методу Роквелла.

**Результаты исследований.** *Образец № 1.* Микроструктура наплавленного металла представляет собой зерна первичного аустенита, с расположенной по их границам хромисто-карбидной эвтектикой (рис. 1). Твердость наплавленного металла HRC 44...46. Наблюдаются также единичные зоны с отличающейся структурой размерами от 0,5 до 2...3 мм, расположенные примерно на расстоянии 5...6 мм от поверхности наплавленного слоя и 1...3 мм от зоны сплавления. По-видимому, эти зоны имеют одинаковые причины возникновения. Зоны, имеющие крупные зерна аустенита (рис. 2), возникли из-за наличия в дробь значительного количества гранул относительно

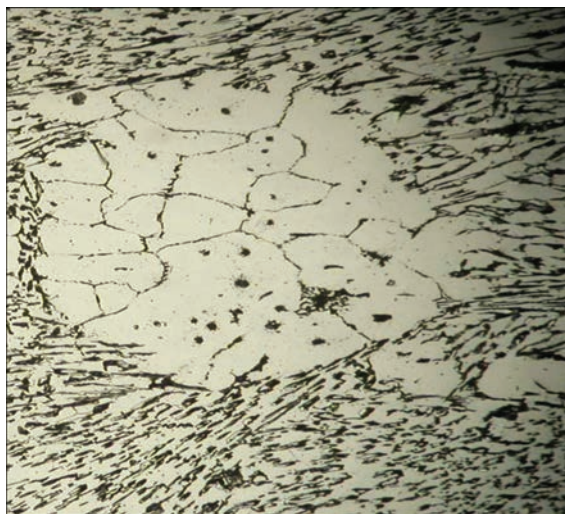


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 100$ ) включений с крупными зернами аустенита в наплавленном высокохромистом чугуне образца № 1

большого размера ( $\geq 3$  мм), структура металла которых сохраняется при их расплавлении в случае недостаточного количества тепла, поступающего к их поверхности.

Зоны с микрокристаллической структурой (рис. 3) представляют собой расплавленные дробинки относительно малого диаметра, металл которых не успел растечься и смешаться с остальным наплавленным металлом. Появление зон обоих типов связано с имевшим место несоответствием массовой скорости подачи наплавочной дробь ее фракционному составу и электрическому режиму наплавки.

Микроструктура основного металла представляет собой крупные вытянутые зерна аустенита, по границам которых наблюдаются выделения карбидов. По мере удаления от линии сплавления размер и количество карбидов уменьшается. Можно предположить, что такие структурные изменения связаны как с термическим циклом наплавки, так и перемешиванием основного и наплавленного металлов.

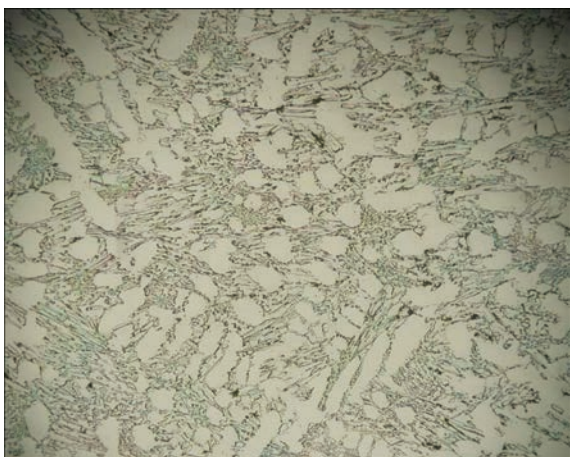


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 100$ ) наплавленного высокохромистого чугуна образца № 1

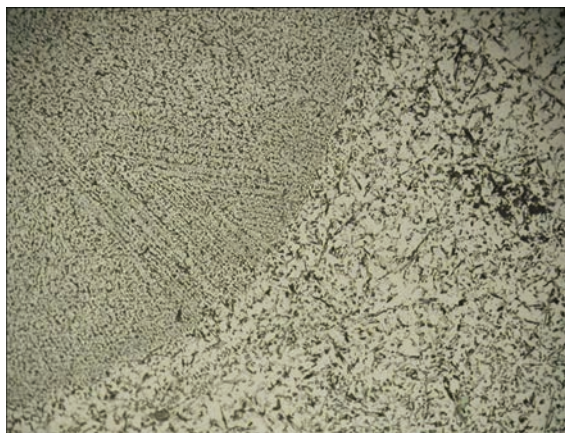


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 100$ ) включений с мелкокристаллическим строением в наплавленном высокохромистом чугуне образца № 1



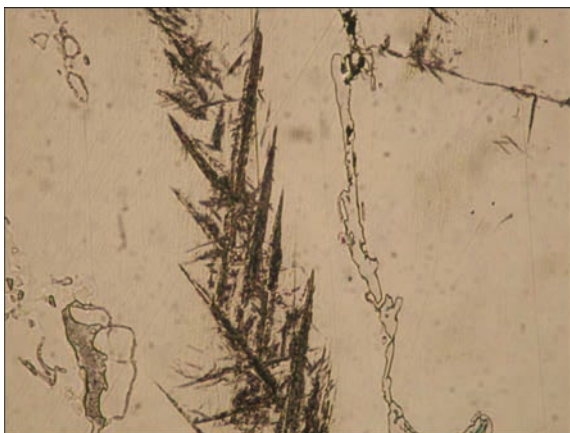


Рис. 4. Фаза с игольчатой структурой в зоне соединения основного и наплавленного металлов образца № 1 ( $\times 500$ )

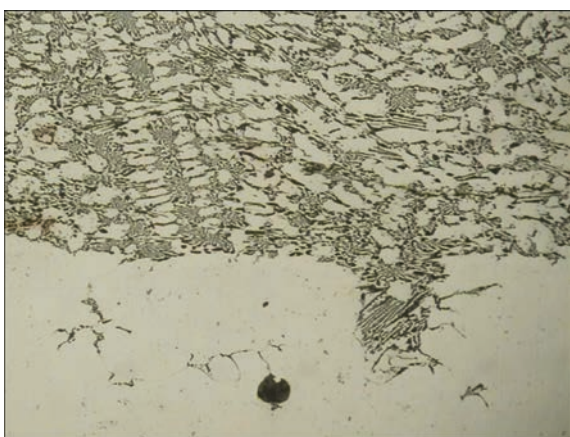


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 100$ ) зоны сплавления образца № 2 (без травления основного металла)

Биметаллическое соединение образуется путем плавного перехода наплавленного металла к основному, хотя в отдельных местах встречаются разрозненные выделения игольчатой фазы (рис. 4). Твердость зоны сплавления низкая и составляет всего  $HRC\ 18...22$  (при твердости основного металла  $HRC\ 12...15$ ). Это предполагает отсутствие значительных скоплений твердых и хрупких составляющих, а также позволяет считать эту зону способной сопротивляться повышенным ударным нагрузкам. Сравнение результатов данного исследования с результатами, полученными на образцах, наплавленных электродом большого сечения примерно такого же химического состава в обычном кристаллизаторе [10], показывает, что во втором случае достичь повышенных прочностных свойств соединения удастся только при дополнительном легировании чугуна марганцем (до 8 %), что ухудшает его износостойкость.

**Образец № 2.** Микроструктура наплавленного металла (при толщине наплавленного слоя около 20 мм) аналогична микроструктуре металла образца № 1. Значительные изменения наблюдаются в зоне сплавления основного и наплавленного

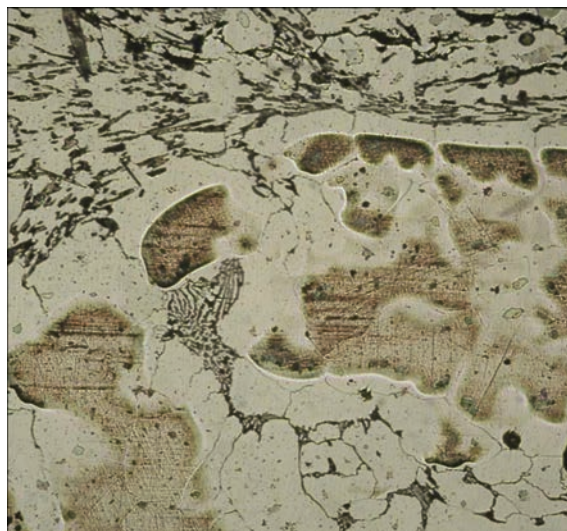


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 125$ ) зоны сплавления образца № 2 (после травления)

металлов. В этой зоне имеются локальные включения структурных составляющих разных размеров высокохромистого чугуна в металле основы (рис. 5), а также встречаются дефекты литейной стали в виде пор (округлые включения темного цвета). Вследствие значительного перемешивания стали и чугуна в зоне сплавления формируется большое количество разнообразных фаз (рис. 6). Тем не менее, твердость этой зоны относительно низкая —  $HRC\ 17$ . Следовательно, даже при значительном перемешивании основного и наплавленного металлов можно получать биметаллические соединения с достаточно пластичной переходной зоной.

Выполненные исследования показывают, что ЭШН деталей из стали 110Г13Л дробью из высокохромистого чугуна в ТПК обеспечивает минимальное проплавление металла основы и позволяет получать качественные биметаллические соединения с пластичной зоной перехода от стали к чугуну.

### Список литературы

1. Гарбер М. Е. (1972) *Отливки из износостойких белых чугунов*. Москва, Машиностроение.
2. Цыпин И. И. (1983) *Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства*. Москва, Металлургия.
3. Жуков А. А., Сильман Г. И., Фрольцов М. С. (1984) *Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов*. Москва, Машиностроение.
4. Гаврилюк В. П., Тихонович В. И., Шалевская И. А., Гутько Ю. И. (2010) *Абразивостойкие высокохромистые чугуны*. Луганск, Ноулидж.
5. Пономаренко В. П., Шварцер А. Я., Стойко В. П. (1984) Свойства сплавов для электрошлаковой наплавки изношенных деталей. *Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 82–86.
6. Шварцер А. Я., Дорохов В. В., Пономаренко В. П. (1982) Развитие способов электрошлаковой наплавки зубьев ковшей экскаваторов. *Современные способы наплавки и их применение*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 70–77.



7. Шварцер А. Я., Валиц К. А., Стойко В. П. (1985) Технико-экономическая эффективность электрошлаковой технологии восстановления зубьев ковшей экскаваторов. *Наплавка. Опыт и эффективность применения*, сс. 62–64.
8. Пономаренко В. П., Шварцер А. Я., Строганова Г. В. (1985) Исследование зоны сплавления высокохромистого чугуна с высокомарганцевой сталью при электрошлаковой наплавке. *Металловедение и терм. обработка металлов*, **11**, 55–58.
9. Киселева И. В., Дорохов В. В., Шварцер А. Я., Герасимов Е. А. (1989) Регулирование протяженности переходной зоны методом электрошлакового обогрева. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 15–19.
10. Кусков Ю. М., Скороходов В. Н., Рябцев И. А., Сарычев И. С. (2001) *Электрошлаковая наплавка*. Москва, ООО «Наука и технологии».

## References

1. Garber, M.E. (1972) *Castings from wear-resistant white cast irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Tsypin, I.I. (1983) *Wear-resistant white cast irons. Structure and properties*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Zhukov, A.A., Silman, G.I., Frolov, M.S. (1984) *Wear-resistant castings from complexly-alloyed white cast irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Gavrilyuk, V.P., Tikhonovich, V.I., Shalevskaya, I.A., Gutko, Yu.I. (2010) *Abrasion-resistant high-chromium cast irons*. Lugansk, Knowledge [in Russian].
5. Ponomarenko, V.P., Shvartser, A.Ya., Stojko, V.P. (1984) Properties of alloys for electroslag surfacing of worn parts. *New processes of surfacing, properties of deposited metal and transition zone*. Kiev, PWI, 82-86 [in Russian].
6. Shvartser, A.Ya., Dorokhov, V.V., Ponomarenko, V.P. (1982) Development of methods of electroslag surfacing of excavator bucket teeth. *Modern methods of surfacing and their application*. *Ibid.*, 70-77 [in Russian].
7. Shvartser, A.Ya., Valits, K.A., Stojko, V.P. (1985) Technical and economical efficiency of electroslag technology for restoration of excavator bucket teeth. *Surfacing. Experience and efficiency of application*. *Ibid.*, 62-64 [in Russian].
8. Ponomarenko, V.P., Shvartser, A.Ya., Stroganova, G.V. (1985) Examination of fusion zone of high-chromium cast iron with high-manganese steel in electroslag surfacing. *Metallvedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **11**, 55-58.
9. Kiseleva, I.V., Dorokhov, V.V., Shvartser, A.Ya., Gerasimov, E.A. (1989) Regulation of length of transition zone by electroslag heating method. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 15-19 [in Russian].
10. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A., Sarychev, I.S. (2001) *Electroslag surfacing*. Moscow, ООО Наука и Технологии [in Russian].

Ю. М. Кусков, Ф. К. Биктагіров, Т. І. Грищенко,  
О. І. Євдокимов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ВИСОКОХРОМИСТОГО ЧАВУНУ НА СТАЛЬ 110Г13Л

Представлено результати металографічного дослідження металу дослідних наплавлень дріб'ю з високохромистого чавуну в струмopідвідному кристалізаторі зразків зі сталі 110Г13Л. Показано можливості отримання якісних біметалевих з'єднань і особливості формування зони сплаву металів при мінімальному і максимальному проплавленні основного металу. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 6.

**Ключові слова:** електрошлакове наплавлення, струмopідвідний кристалізатор, наплавляюча дріб, високохромистий чавун, сталь 110Г13Л, структура металу

Yu.M. Kuskov, F.K. Biktigirov, T.I. Grishchenko,  
A.I. Evdokimov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## ELECTROSLAG SURFACING OF HIGH-CHROMIUM CAST IRON WITH 110G13L STEEL

The paper presents the results of metallographic investigation of metal at test surfacing of 110G13L steel samples with high-chromium cast iron shot in current-supplying mould. Possibility of producing sound bimetal joints and features of formation of metal fusion zone at minimum and maximum penetration of base metal are shown. 10 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

**Keywords:** electroslag surfacing, current-supplying mould, surfacing shot, high-chromium cast iron, 110G13L steel

Поступила в редакцию 18.01.2018

## Издательский Дом «Патон»

Предлагаем отпечатать Вашу статью, опубликованную в журнале «Автоматическая сварка» и на английском языке в журнале «The Paton Welding Journal», отдельным оттиском определенного тиража.

Оттиск статьи может быть оформлен в соответствии с пожеланиями. Размещение рекламы в нем также возможно.

Для получения дополнительной информации просьба обращаться в редакцию журнала: 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича 11, тел./факс: (38044) 200-82-77.  
journal@paton.kiev.ua, www.patonpublishinghouse.com



# ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ «УТЕЧКА ДО РАЗРУШЕНИЯ» ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЛАВИННОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕНКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СВАРНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

А. Ю. БАРВИНКО, Ю. П. БАРВИНКО, А. Н. ЯШНИК, В. Н. МИРЯНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

В работе рассмотрена возможность повышения работоспособности резервуаров для хранения нефти вместимостью 50...120 тыс. м<sup>3</sup> путем применения для расчетных поясов стенки нормализованной листовой стали 09Г2СЮч-У390 и 09ХГ2СЮч-У440. Экспериментально в условиях плоской деформации на начальном этапе развития сквозной трещины установлена связь между длиной сквозной усталостной трещины в сварном стыковом соединении исследуемой стали и количеством циклов нагружения емкости. На основании полученной связи установлено, что после образования в сварном соединении стенки сквозной трещины и появления утечки нефти есть достаточное время и условия для ее визуального обнаружения и принятия мер по устранению выявленного дефекта. Возможность применения данного способа обнаружения сквозной трещины является доказательством того, что резервуары с расчетными поясами из исследуемой стали удовлетворяют критерию утечки до разрушения. Библиогр. 19, табл. 5, рис. 4.

*Ключевые слова:* резервуары хранения нефти, усталостная трещина, циклическое нагружение, стыковое сварное соединение, лавинное разрушение, критерий утечки до разрушения

Развитие промышленного производства требует постоянного повышения внимания к охране окружающей среды. В данной публикации на примере строительства резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов ( $V = 50...120$  тыс. м<sup>3</sup>) показана возможность повышения экологической безопасности данных объектов путем предупреждения развития лавинных разрушений в сварных соединениях стенки в случае применения для расчетных поясов нормализованной листовой стали класса прочности С390, С440 с пониженным содержанием углерода. В соответствии с нормами Украины [1], указанные объекты относятся к высшему классу последствий ответственности ССЗ, что учитывается введением в условие прочности коэффициента надежности  $\gamma_n = 1,25$ . Наряду с повышением прочности ужесточены нормы учета сейсмического воздействия при строительстве новых объектов. В нормах [2] некоторые районы Карпат и Одесской области имеют сейсмичность 8-9 баллов при средней (второй) категории грунтов на площадке строительства и, соответственно, на один балл выше при более высокой категории. Наряду с приведенными положениями в стандарте [3] введено дополнительное требование для резервуаров с защитной стенкой: конструкция стенки рабочего резервуара должна предотвращать возможность ее лавинного разрушения. Повышены требования к качеству листового проката и его сварных соединений. В конечном итоге принятые изменения и дополнения к нормативным актам направлены на обеспечение нормативной работоспособности

и экологической безопасности сооруженных резервуаров на протяжении всего расчетного срока их службы. В достижении поставленных требований одним из основных вопросов является обеспечение высокой работоспособности сварных стыковых соединений стенки.

В последние годы разработаны и освоены в промышленном производстве новые качественные нормализованные стали класса прочности С390 и С440 для ответственных строительных конструкций. Выполненная в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) оценка соответствия их механических характеристик требованиям действующих стандартов по созданию резервуаров позволила найти и предложить новые подходы к решению ряда вопросов по повышению работоспособности стенки. В табл. 1 приведены основные характеристики листового проката толщиной 16...40 мм, класса прочности 390–440, рекомендуемого стандартами США, ЕС, Украины [3–6] для основных металлоконструкций резервуаров вместимостью 20...120 тыс. м<sup>3</sup>. Там же приведены основные требования стандартов к листовой стали: состояние поставки листа, содержание углерода, ударная вязкость  $KCV_{40}$ , соотношение  $\sigma_T/\sigma_B$ .

Из данных таблицы видно, что в стандарте API 650[4] представлены две стали: А537 и А678 с поставкой листа закалка-отпуск (ЗО). Стали удовлетворяют всем предъявляемым требованиям, за исключением довольно высокого содержания углерода: 0,24; 0,20 %. Евростандарт представ-

Таблица 1. Рекомендуемые марки стали для основных металлоконструкций резервуаров большой вместимости согласно стандартам США, ЕС, Украины

Наименование стандарта на проектирование резервуаров (страна действия)	Обозначение рекомендуемой стали, толщина листа	Нормативный документ на поставку стали	Состояние поставки*	Содерж. углерода, %, (max)	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	KCV согласно нормативного документа на поставку стали, Дж/см <sup>2</sup> /T <sub>исп</sub> , °C	$\sigma_T/\sigma_B$
API 650 11-е издание (США)	A537M класс 2, C415, $t \leq 45$ мм	Спецификация ASTM A537/A537M	3/O	0,24	415	550...690	22	34/-68	0,75...0,60
	A678M марка B, C415, $t \leq 45$ мм	Спецификация ASTM A678/A678M	3/O	0,20	415	550...690	22	34/-68	0,75...0,60
	A841M марка B класс 2, C415, $t \leq 40$ мм	Спецификация ASTM A841/A841M	TMCP	0,15	415	550...690	22	34/-68	0,75...0,60
EN 1993-4-2:2007 EN 14015:2004 (страны ЕС)	EN 10025-3-S420N, C420, $16 < t \leq 40$ мм	EN 10025-3:2004	H	0,22	420 400	520...680	19	25/-20	0,81...0,62
	EN 10025-3-S420NL, C420, $16 < t \leq 40$ мм	EN 10025-3:2004	H	0,22	420 400	520...680	19	34/-20 25/-40 20/-50	0,81...0,62
Стали, которые не вошли в перечень рекомендуемых, но применяются при строительстве резервуаров	18G2AV/E440R-N C440, $16 < t \leq 30$ мм	PN-86/H-84018	BO, H	0,20	430	560...720	18	83/-40 – данные заводских сертификатов	0,77...0,60
	06ГБ C390, $8 < t \leq 50$ мм	ТУ У 27.1-05416923-085:2006	BO, 3/O	0,08	390	490	22	123/-40	0,80
	06Г2Б C440, $8 < t \leq 50$ мм			0,08	440	540	22	98/-60 74/-70	0,81
	09Г2СЮч-У C390, $8 < t \leq 50$ мм	ТУ 14-1-5065:2006 Изменение №1 от 01.03.2012г.	BO, H	0,13	390	530	18	60/-40 30/-70	0,74
	09ХГ2СЮч-У C440, $20 < t \leq 32$ мм C440, $32 < t \leq 60$ мм			0,11	440 410	590 570	18	60/-40 30/-70	0,75 0,72
* Условные обозначения состояния поставки стали: 3/O — закалка с отпуском; BO — внепечная обработка; TMCP — термомеханическая контролируемая прокатка; 3/BO — закалка с высоким отпуском; H — нормализация; ТУ — термическое упрочнение.									

лен сталями после нормализующего проката S420 и S460 [5] с содержанием углерода 0,18...0,22 % и соотношением  $\sigma_T/\sigma_B$  равным 0,81...0,62, при норме не более 0,75 [3]. Приведен в таблице и пример применения для стенки резервуаров вместимостью 75 тыс. м<sup>3</sup> нормализованной стали 18G2AV/E440R-N, улучшенной внепечной обработкой (BO) [7]. После улучшения показатели KCV<sub>40</sub> составили не менее 96 Дж/см<sup>2</sup>, что почти в два раза больше исходных значений. Украина представлена листовым прокатом 06ГБ с  $\sigma_T/\sigma_B = 0,90...0,85$ , поставка 3O и двумя нормализованными сталями 09Г2СЮч-У390 и 09ХГ2СЮч-У440 [8] с содержанием углерода 0,11...0,13 % и соотношением  $\sigma_T/\sigma_B$  не более 0,75.

Стали 09Г2СЮч и 09ХГ2СЮч [9] были разработаны в 1982–1984 гг. по инициативе ИЭС им. Е. О. Патона, совместно с металлургическими комбинатами «Азовсталь» (Украина) и «Северсталь» (Россия). На первом этапе разрабатывалась листовая сталь 09Г2СЮч. По свойствам

она должна была соответствовать сталям общего назначения и быть альтернативой сталям 09Г2С, 16ГС, 20К при производстве сосудов высокого давления. Основными требованиями к новой стали были повышенная прочность (класс 390), высокая хладостойкость ( $KCV_{40} \geq 60$  Дж/см<sup>2</sup>), низкая чувствительность к перегреву при электрошлаковой сварке листов толщиной 40...120 мм. В основу разработки новой стали была положена низколегированная сталь массового назначения 09Г2С. Достоинства новой стали обеспечивались оптимальным ее легированием и технологией производства: повышенное содержание марганца, дополнительное легирование алюминием и церием в сочетании с внепечной обработкой. Процесс разработки новой стали, технология ее получения и результаты успешного применения для изготовления сварных сосудов высокого давления толщиной 40...110 мм довольно полно изложены разработчиками стали в работе [10]. Достигнутый положительный эф-



фект применения стали 09Г2СЮч позволил ее авторам в дальнейшем путем дополнительного легирования введением в сталь примерно 1 % хрома оптимизировать ее состав. Была получена новая сталь 09ХГ2СЮч класса прочности С440 [11]. Увеличение в стали хрома существенно увеличило ударную вязкость, повысило прочность стали и ее хладостойкость в зоне термического влияния (ЗТВ) при электрошлаковой сварке, что позволило заменить послесварочную нормализацию сосудов высоким отпуском [10, 11]. Новые стали в улучшенном варианте получили обозначение 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У, класс прочности 390 и 440 и выпускались по ТУ [9]. В 2011 г., по инициативе ИЭС им. Е. О. Патона и ФГУП «ЦНИИ-Чермет им. И. П. Бардина» было разработано Изменение № 1 к данным техническим условиям, что позволило получить механические свойства сталей [8] в полном соответствии с требованиями стандартов [3–5] на резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов.

В работе [12] показано, что высокие пластические свойства листовой нормализованной стали 09Г2СЮч-У дают возможность отказаться от высокого отпуска узлов врезки патрубков и люков при толщине стенки резервуара до 30 мм и выявлять усталостные сквозные трещины на начальном этапе их развития с применением критерия утечки до разрушения. В данной публикации на основании результатов выполненных экспериментальных исследований сварных соединений нормализованной листовой стали 09ХГ2СЮч-У, включая основной металл, показано, что аналогичные возможности имеются и в стенке резервуаров при применении для расчетных поясов данной стали.

В Украине производство сталей по техническим условиям [8] освоено МК «Азовсталь», а разработанная в ИЭС технология сварки обеспечивает их механические свойства на уровне основного металла. Нормативные значения ударной вязкости листового проката  $KCV_{40} \geq 60$  Дж/см<sup>2</sup> для толщины 20...32 мм. При поставке листов  $t = 26$  мм ста-

ли 09Г2СЮч-У на два резервуара вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> сертификатные данные  $KCV_{40}$  были не ниже 148 Дж/см<sup>2</sup>.

Необходимость дополнительных технических предложений для гарантированного предотвращения лавинных разрушений сварных соединений стенки внутреннего резервуара (для емкостей с защитной стенкой) в стандарте [3] — это следствие возникшей необходимости строительства значительного числа таких резервуаров вместимостью 50...100 тыс. м<sup>3</sup>. Отказ от обвалования вокруг резервуаров при отсутствии фактических данных о выполнении этой функции защитной стенкой привел к необходимости предусматривать дополнительные мероприятия по повышению работоспособности стенки основного (внутреннего) резервуара. С учетом новых требований нормативных документов в настоящей работе представлен анализ результатов выполненных в ИЭС исследований о возможности предупреждения лавинных разрушений путем применения критерия «утечки до разрушения» для расчетных поясов стенки резервуаров вместимостью 20...120 тыс. м<sup>3</sup> при использовании листового нормализованного проката стали 09ХГ2СЮч-У.

Теоретические основы возможности исключения лавинного разрушения стенки в металлических емкостях для хранения жидкости по ее истечению из образовавшейся трещины приведены в [13], а обзор состояния данного вопроса на сегодня в [14]. В работе [13] рассмотрена усталостная поверхностная трещина длиной примерно  $2t$ , которая в процессе циклического нагружения растет и выходит на противоположную сторону стенки. Через сквозную трещину образуется утечка хранимой жидкости, которая позволяет визуально обнаружить дефект. Важно, чтобы до достижения образовавшейся сквозной трещиной своего критического размера было достаточно времени ее обнаружить и принять меры по устранению выявленного дефекта, т. е. предотвратить лавинное разрушение. Такое исключение лавинного разрушения получило название «по критерию утечки до разрушения». В работе [14] отмечено, что лите-

Т а б л и ц а 2. Химический состав исследуемой стали 09ХГ2СЮч-У, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Al	S	P	Cu	Ni
						не более			
09ХГ2СЮч-У ТУ 14-1-5065-2006 (изменение № 1)	0,10...0,13	0,50...0,80	1,9...2,2	1,0...1,30	0,04...0,08	0,030	0,030	0,30	0,30
09ХГ2СЮч-У (исследуемая)	0,10	0,50	1,84	0,96	0,03	0,002	0,002	0,05	0,12
09Г2СЮч-У ТУ 14-1-5065-2006 (изменение № 1)	0,08...0,11	0,30...0,60	1,9...2,2	Не более 0,30	0,04...0,08	0,030	0,030	0,30	0,30
09Г2СЮч-У (данные [12])	0,11	60	2,1	0,11	0,08	0,011	0,015	0,05	0,21

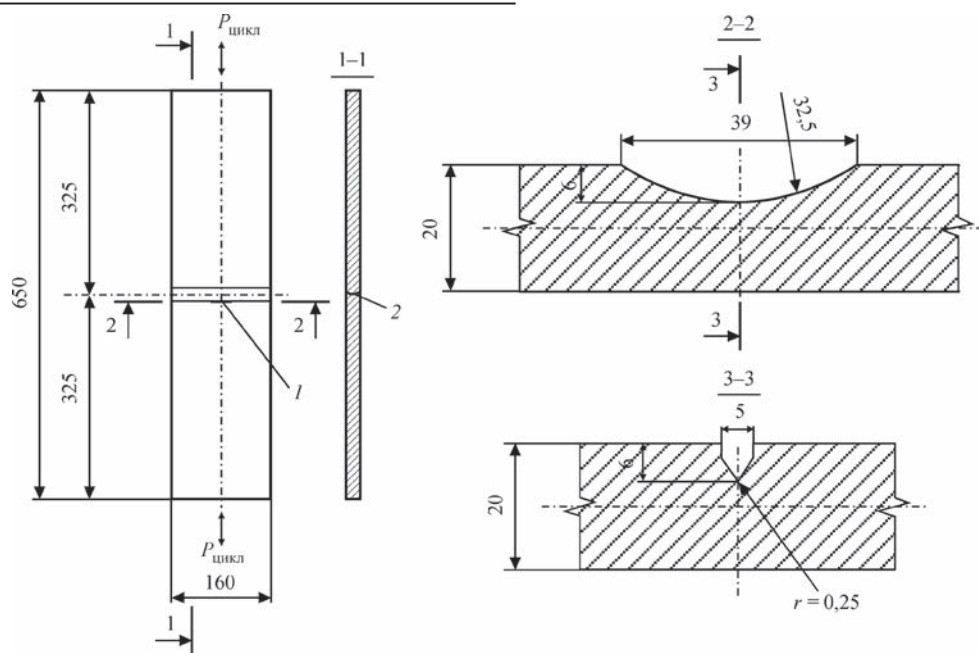


Рис. 1. Схема образца для испытания сварных соединений стали 09ХГ2СЮч-У на стойкость к развитию усталостной трещины: 1 — надрез по ЗТВ; 2 — усиление шва снято с двух сторон

ратурные данные не дают достаточной информации по рассматриваемому критерию относительно его применения в резервуарах для хранения нефти и других конструкциях. В каждом отдельном случае необходимо выполнение специальных экспериментальных исследований.

В работе [12] приведены результаты исследований сварных соединений стали 09Г2СЮч-У и программа их испытаний. Рассматриваемые исследования сварных соединений стали 09ХГ2СЮч-У также выполнены по данной программе с дополнением и учетом некоторых особенностей испытуемой стали. Программа включала испытание при циклическом нагружении трех образцов с поперечным стыковым швом (рис. 1). Поперечный стыковой шов имитировал вертикальный стыковой шов соединения листов стенки толщиной 20 мм с К-образной разделкой кромок. Химический состав и механические свойства листового стали 09ХГ2СЮч-У представлены в табл. 2, 3. При сварке шва корневой проход вы-

полняли электродами LB52U диаметром 2,5 мм, а заполнение — FOX EV63 диаметром 3,0. Скорость охлаждения  $w_{5/6}$  составляла 10...15 °C/с. Значения  $KCV_{-40}$  в состоянии после сварки составили: 113,5...116,5 (линия сплавления) и 104,9...156,7 Дж/см<sup>2</sup> (металл шва). Для сравнения в таблицах представлены аналогичные данные для стали 09Г2СЮч-У из работы [12].

Цель исследований состояла в установлении на начальном участке образования и развития сквозной усталостной трещины в вертикальном сварном стыковом соединении стали 09ХГ2СЮч-У стенки резервуара связи между длиной трещины и количеством циклов наполнения–опорожнения емкости. При этом показать, что полученная связь развития усталостной трещины в стенке резервуара, заполненного нефтью, позволяет безопасно обнаружить усталостную трещину по критерию утечки до разрушения и своевременно принять меры по ликвидации выявленного дефекта.

Таблица 3. Механические характеристики листового проката стали 09ХГ2СЮч-У440 толщиной 23 мм

Номер п/п	Номер плавки	Толщина листа, мм	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi_z$ , %	$\sigma_t/\sigma_b$	$KCV_{-40}$ , Дж/см <sup>2</sup>
1	Исследуемая 09ХГ2СЮч-У	23	472,1 472,9	768,6 768,2	22,5 22,7	47,8 41,0	0,61	205,0 / 135,7** 196,4 / 100,1** 199,0 / 121,1**
2	По ТУ 14-1 5065-2006	20...32	440	590	18	-	≤ 0,75	60, не менее
3	Изменение 1. Вид поставки: нормализация 09Г2СЮч-У	20...32	390	530	18	-	≤ 0,75	60, не менее
4	09Г2СЮч-У* Данные[12]	20	415	550	29	56	0,75	156

\* Данные по стали 09Г2СЮч-У390 приведены для сравнения. \*\* Поперечные образцы/ продольные. 1. Сталь подвергается внепечной обработке с продувкой аргоном. 2. Массовая доля церия в стали должна быть в пределах 0,001...0,050 %. 3. Содержание в исследуемой стали Се — 0,004.

Максимальное усилие циклического нагружения образца  $P_{\max}$  принималось с учетом, что напряжение в образце  $\sigma = 2/3 \sigma_T$  стали, а  $P_{\min} = 0,1P_{\max}$ . Напряжение  $2/3 \sigma_T$  соответствует, согласно работам [3, 4], максимальным расчетным кольцевым напряжениям в стенке резервуара. В каждом образце учитывались фактические размеры поперечного сечения. Зарождение усталостной трещины по линии сплавления инициировали путем применения острого надреза глубиной 6 мм и длиной 39 мм (рис. 1). В процессе роста по толщине стенки согласно диаграмме усталостных разрушений (ДУР) (см. рис. 2) макротрещина прошла участок своего стабильного развития, перешла на участок нестабильного развития и вышла на противоположную сторону. Последний участок критического развития сквозной трещины в условиях плоской деформации (рис. 3, а), характеризуется высокой скоростью ее роста (см. рис. 2). На принятых образцах длина данного участка ограничена протяженностью зоны плоской деформации. На рис. 3, б видно, что после длины трещины примерно 35 мм на ее концах появляются линии утяжки стали по толщине (типа муаровых полос), что свидетельствует о переходе металла впереди трещины в плоское напряженное состояние. Это следствие резкого приближения значения  $\sigma_{\max}$  к величине  $\sigma_T$  стали при уменьшении площади нетто поперечного сечения образца. Развитие поверхностной усталостной трещины в вертикальном сварном соединении на реальной стенке резервуара будет происходить при фактически постоянном уровне кольцевых напряжений, вплоть до достижения образовавшейся сквозной усталостной трещиной своей критической длины  $l_{кр} = 2a_{кр} \approx 250...300$  мм. Для данных испытаний важно, что процесс начального прорастания трещины по толщине, выход ее на противоположную поверхность

образца и начальный этап развития сквозной трещины в условиях плоской деформации будет во многом аналогичный протеканию этого процесса в сварном соединении на стенке резервуара. Принятое условие выполнимо при проведении 100 % ультразвукового (УЗ) (радиографического) контроля длины вертикальных расчетных швов стенки резервуара.

Результаты замеров количества циклов нагружений и соответствующие значения длины поверхностной трещины даны в табл. 4, 5.

Из табл. 4 видно, что при начальной длине надреза ( $l_{\text{нач.пов.тр}}$ ) 39 мм в момент образования сквозной трещины длина поверхностной ( $l_{\text{кон.пов.тр}}$ ) трещины составила 53 мм. Образовавшиеся с двух сторон «усы» (рис. 4) имели длину 6...7 мм. Моменту образования сквозной трещины предшествовало появление нестабильности поверхности по линии выхода трещины. Зона развития трещины находилась в условиях плоской деформации. На зеркальной поверхности образца при каждом цикле раскрытия приближающейся трещины наблюдались упругие волновые деформации на линии ее появления. Сквозная трещина образовалась в виде разрыва длиной 5...7 мм ( $l_{\text{нач.скв.тр}}$ ). Произошел выход накопленной в образце потенциальной энергии с остановкой развития трещины на 5...7 с, что равно 20...30 циклам нагружения. После этого начался процесс подрастания длины уже сквозной трещины до критического размера для данного образца. Это время действия критерия утечки до разрушения. На образце, как отмечалось выше, данное время ограничено еще и протяженностью зоны плоской деформации. Приведенные в табл. 4, 5 данные относительно развития трещины от надреза и развитие сквозной трещины можно рассматривать как два последовательных этапа. Ниже приведен краткий анализ данных табл. 4, 5



Рис. 2. Участки развития макротрещины на диаграмме усталостного разрушения [15]



Рис. 3. Развитие усталостной сквозной трещины: рост в условиях плоской деформации (а) и образование утяжки стали по толщине образца на концах сквозной трещины при ее длине  $2a \geq 35$  мм (б)





Рис. 4. «Усы» на концах трещины со стороны надреза перед выходом на противоположную поверхность

относительно развития рассматриваемого дефекта в сварном соединении стали 09ХГ2СЮч-У.

*Первый этап.* Согласно данных табл. 4 усталостная трещина по всей длине (39 мм) острого надреза (рис. 1) зародилась при количестве циклов  $N_{\text{зар.пов.тр}} = 10,3$  тыс. (среднее трех образцов). С учетом принятого коэффициента запаса на количество циклов нагружений  $n_z = 10$  [16], имеем 1000 циклов. При количестве циклов наполнения-опорожнения резервуара в год  $N_{\text{год}} = 100$  [3] имеем 10 лет. При принятой периодичности технического и экспертного обследования резервуаров (5 и 10 лет) [17] такой дефект визуально или при выполнении УЗ контроля, должен быть обнаружен и устранен. Если начальная трещина будет пропущена, то она продолжит свое развитие в направлении толщины стенки (образца). Из табл. 4 видно, что до образования сквозной трещины необходимо около 11,4 тыс. циклов нагружений  $N_{\text{скв.тр}}$ . При начальной глубине усталостной трещины 2 мм скорость подрастания трещины по глубине составила  $1,1 \cdot 10^{-7}$  м/цикл. На ДУР (см. рис. 2) видно,

что процесс подрастания происходил на участке стабильного развития трещины при постоянном увеличении скорости роста. Здесь также есть возможность своевременного визуального обнаружения трещины при обследовании стенки резервуара. Анализ процесса начального развития усталостной трещины в сварном соединении стали 09ХГ2СЮч-У показывает, что наличие трещины на всю толщину стенки может быть следствием только грубого нарушения периодичности обследования резервуара или при его некачественном выполнении. На рис. 4 показана образовавшаяся перед выходом на противоположную сторону от острия надреза усталостная трещина и ее развитие в виде «усов» на концах надреза.

*Второй этап.* В табл. 5 приведены данные роста длины образовавшейся сквозной трещины в сварном соединении образца в условиях плоской деформации. Судя по скорости ее развития на ДУР (см. рис. 2) — это заключительный этап нестабильного развития усталостной макротрещины. Как отмечено выше, на образце существенно ограничена длина зоны плоской деформации. При относительно высокой скорости подрастания сквозной трещины здесь счет циклов идет на сотни. По данным табл. 5 можно утверждать, что трещина с 7 до 16 мм подросла за 300 циклов нагружений. После 300...400 циклов нагружения на поверхности концов трещины начали проявляться признаки деформации (рис. 3, а), которые при длине трещины более 35 мм перешли в утяжку по толщине образца (рис. 3, б). Полученная хорошая сходимость роста трещины на трех образцах объ-

Таблица 4. Зависимость длины 2а сквозной трещины со стороны, противоположной надрезу, от количества циклов нагружения N (сталь 09ХГ2СЮч-У440, t = 20 мм)

Номер образца	Марка стали, условия выполнения сварного соединения	Начальная длина трещины 2а, мм N = 0,00	Количество циклов нагружения N						
			100	150	200	250	300	400	600
			Длина сквозной трещины 2а (мм) с учетом начальной длины						
1	09ХГ2СЮч-У, нормализованная	7	10	-	14	-	6	20	26
2		7	10	-	14	-	16	18	20
3		4	8	-	12	-	14	15	17
4	09Г2СЮч-У390*, нормализованная	8	10	11	12	11	14	20	25
5		10	12	-	14	-	16	20	30
6		12	14	-	18	-	24	27	32

\* Данные по стали 09Г2СЮч-У390 приведены для сравнения.

Таблица 5. Зависимость длины усталостной поверхностной трещины в сварном стыковом соединении от количества циклов нагружения (сталь 09ХГ2СЮч-У440, t = 20 мм)

Номер образца	Марка стали	$N_{\text{пов.зар.тр.}}$ , тыс.	$l_{\text{нач.пов.тр.}}$ , мм	$N_{\text{скв.тр.}}$ , тыс.	$l_{\text{кон.пов.тр.}}$ , мм	$l_{\text{нач.скв.тр.}}$ , мм
1	09ХГ2СЮч-У440 нормализованная	10200	39	8100	53	7
2		10500	39	11800	53	7
3		7500**	39	13500	51	4
4	09Г2СЮч-У390* нормализованная	12100	41	11400	61	8
5		13300	38	9400	56	10
6		14600	47	5800	56	12

\* Данные по стали 09Г2СЮч-У390 приведены для сравнения. \*\* Была техническая остановка машины с повторным пуском и выходом на режим.

ясняется, с учетом работы [18], практически одинаковыми значениями показателей  $KCV_{-40}$  для всех зон сварного соединения.

Следует отметить, что возможности применения критерия утечки до разрушения для обнаружения сквозных усталостных трещин в металлических стенках емкостей весьма ограничены. Применительно к сосудам давления дефекты типа сквозная усталостная макротрещина недопустимы [16]. Сварные цилиндрические резервуары относятся к тем немногим сооружениям, конструкция которых и режим эксплуатации создают условия для визуального обнаружения сквозной усталостной макротрещины на поверхности сварных соединений стенки по вытекающей из нее нефти. Стенка резервуара представляет собой гладкую цилиндрическую поверхность, полностью открытую для визуального осмотра. При высоте стенки до 22 м давление хранимого продукта на стенку не превышает 0,2 МПа, температура нефти в емкости не превышает 50 °С. Нефть и нефтепродукты отличаются высокой проницательной способностью. Практика показывает, что уже при длине сквозной трещины 3...5 мм визуально наблюдается их просачивание через трещину с образованием на поверхности стенки темных пятен (отпотин). На открытой поверхности такие нефтяные пятна при осмотре хорошо обнаруживаются. Из условий эксплуатации необходимо более подробно рассмотреть длительность цикла заполнения — опорожнения резервуара. Для резервуаров вместимостью 50...100 тыс. м<sup>3</sup> длительность полного цикла составляет около 10 ч (скорость подъема в емкости нефти до 4 м/ч). Максимальное количество циклов в год составляет не более 100 [3], т. е. 1 цикл за 3,5 дня или около 8 циклов в месяц. Количество циклов, при котором четко фиксировалась на образце плоская деформация, можно принять 300. Данному количеству соответствовала длина сквозной трещины  $2a = 16$  мм. С учетом коэффициента запаса  $n_z = 10$  [16] имеем 30 циклов контролируемых нагружений, что составляет  $30 \cdot 3,5 \approx 100$  суток. В связи с тем, что по рассматриваемому вопросу имеется ограниченный объем экспериментальных и лабораторных данных [14], создавшийся пробел считаем возможным компенсировать применением  $n_z = 10$ . В итоге получаем расчетное контролируемое время не более 10 суток. Данного времени вполне достаточно для визуального обнаружения нефтяного пятна, выполнения УЗ контроля сварного соединения на участке просачивания нефти и принятия мер по недопущению дальнейшего роста трещины. Выявление и остановка роста трещины в сварном шве — это надежный способ предотвращения образования лавинного разрушения стенки резерву-

аров как с защитной стенкой, так и обычной конструкции, что требуется нормами [3].

Отметим, что помимо рассмотренных в данной публикации и работе [12] листовых сталей, в последнее время отечественными металлургами освоено производство ряда новых конструкционных сталей, в частности, S420M и S460M [19]. Стали выпускаются в состоянии после нормализующей прокатки, позволяющей получать листовой прокат с отношением  $\sigma_T/\sigma_B$  не менее 0,78 для S420 и не менее 0,83 для S460.

При рассмотрении вопроса о применении данных сталей для резервуаров необходимо учитывать особенности напряженного состояния стенки. Стенка резервуаров представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку. При диаметре 60...72 м и толщине нижнего пояса 26...28 мм радиальные перемещения стенки на уровне 1,0 м от дна достигают 40 и 50 мм, соответственно. При данных перемещениях сварной узел сопряжения стенки с дном пластически деформируется, что при расчете учитывается коэффициентом  $\gamma_n = 1,2$ . Кроме того, нужно учитывать, что вваривание патрубков и люков в нижний пояс выполняется в жестком контуре. В таких условиях для исключения образования холодных трещин в кольцевых швах важно, чтобы сталь имела достаточный запас пластичности. С учетом изложенного в стандарте [3] введено требование к отношению  $\sigma_T/\sigma_B \leq 0,75$  для сталей  $\sigma_T \leq 440$  МПа. Важно также, чтобы листовой прокат поставлялся после нормализации, что обеспечивает хорошее качество вальцовки листов и исключает угловые деформации в вертикальных сварных соединениях стенки. Учитывая все приведенные факторы, авторы считают, что на сегодня среди предлагаемых для резервуаров стандартами [3–5] листовых сталей класса прочности С390 и С440 не содержатся приемлемые альтернативы сталям 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У.

Приведенные результаты исследований дают возможность сделать следующие выводы:

1. Механические свойства нормализованных листовых сталей 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У полностью отвечают требованиям стандартов на стальные цилиндрические резервуары. Применение данных сталей существенно повышает работоспособность и экологическую безопасность резервуаров.

2. Применение для расчетных поясов стенки резервуаров вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> и более для хранения нефти и нефтепродуктов листовых нормализованных сталей 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У дает возможность предупреждать лавинные разрушения стенки путем визуального выявления образовавшейся в сварном соедине-

нии сквозной усталостной трещины по критерию утечки до разрушения (пятну истекающей нефти).

3. Для визуального обнаружения трещины по критерию утечки до разрушения и принятия мер по исключению ее возможного развития при рассматриваемых сталях имеется не менее 10 безопасных суток.

### Список литературы

1. ДБН В. 1. 2-14-2009 *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.*
2. ДБН В. 1. 1-12-2014 *Будівництво у сейсмічних районах України.*
3. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 *Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів.*
4. API STANDARD 650 (2013) *Сварные стальные резервуары для хранения нефтепродуктов.*
5. EN 10025-3:2004 Горячекатаный прокат из конструкционных сталей. Технические условия поставки мелкозернистых конструкционных сталей, пригодных к сварке и подвергнутых нормализации/нормализующей прокатке.
6. ДБН В.2.6-198:2014 *Сталеві конструкції. Норми проектування.*
7. Черников О. П., Барвинко А. Ю., Васюттик А. И. и др. (2014) Современное резервуаростроение в Республике Беларусь. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, **2**, 9–13.
8. (2011) ТУ 14-1-5065-2006, Изменение 1. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч, 09Г2СЮч-У, 09ХГ2СЮч и 09ХГ2СЮч-У.
9. ТУ 14-1-5065-2006. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч, 09Г2СЮч-У, 09ХГ2СЮч и 09ХГ2СЮч-У.
10. Егорова С. В., Стеренбоген Ю. А., Юрчишин А. В. и др. (1990) Новая хладостойкая сталь общего назначения с высокой стойкостью против перегрева при сварке. *Автоматическая сварка*, **2**, 52–61.
11. Егорова С. В., Юрчишин А. В., Солина Е. Н. и др. (1991) Хладостойкая сталь повышенной прочности 09ХГ2СЮч для сварных сосудов высокого давления. *Там же*, **12**, 37–41.
12. Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П. (2016) О возможности предотвращения лавинных разрушений стенки цилиндрических резервуаров для хранения нефти путем применения листовой стали с повышенным значением ударной вязкости. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 44–49.
13. Давид Брокс. (1980) *Основы механики разрушения*. Пер. с англ. Москва, Высшая школа.
14. Bourga R., Moore P., Janin Y., BN Wang, J. (2015) Leak-before-break: Global perspectives and procedures. Review Sharples International. *Journal of Pressure Vessels and Piping*, **2**, 43–49.
15. Труфяков В. И. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка.
16. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. В. (1982) *Сварные сосуды высокого давления*. Москва.
17. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008 *Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів.*
18. Гиренко В. П., Дядин В. П. (1985) Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения  $\delta_{1c}$ ,  $K_{1c}$  конструкционных сталей и их сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **9**, 13–20.
19. ДСТУ EN 10025-4:2007. *Вироби горячекатані з конструкційної сталі. Частина 4. Технічні умови постачання термомеханічного оброблення зварюваних дрібнозернистих сталей* (EN 10025-4:2004, IDT).

### References

1. DBN V.1. 2-14-2009: *General principles of reliability insurance and structural safety of buildings, constructions, building structures and foundations* [in Ukrainian].
2. DBN V.1. 1-12-2014: *Construction in seismic regions of Ukraine* [in Ukrainian].
3. DSTU B V.2.6-183:2011: *Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products* [in Ukrainian].
4. API STANDARD 650: *Welded steel tanks for storage of oil products*. 12th Ed., March, 2013 [in Russian].
5. EN 10025-3:2004: Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels.
6. DBN V.2.6-198:2014: *Steel structures*. Codes of design [in Ukrainian].
7. Chernikov, O.P., Barvinko, A.Yu., Vasyutik, A.I. et al. (2014) Modern tank building in Belarus Republic. *Montazhnye i Spets. Raboty v Stroitelstve*, **2**, 9–13.
8. TU 14-1-5065-2006. Modification 1: Thick plate from low-alloy steel of 09G2SYuCh, 09G2SYuCh-U, 09KhG2SYuCh and 09KhG2SYuCh-U grades [in Russian].
9. TU 14-1-5065-2006: Thick plate from low-alloy steel of grades 09G2SYuCh, 09G2SYuCh-U, 09KhG2SYuCh and 09KhG2SYuCh-U [in Russian].
10. Egorova, S.V., Sterenbogen, Yu.A., Yurchishin, A.V. et al. (1990) New cold-resistant steel of general purpose with high resistance to overheating in welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 52–61 [in Russian].
11. Egorova, S.V., Yurchishin, A.V., Solina, E.N. et al. (1991) Cold-resistant 09KhG2SYuCh steel of higher resistance for welded pressure vessels. *Ibid.*, **2**, 37–41.
12. Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P. (2016) On possibility of prevention of avalanche-like fractures of the wall of cylindrical tanks for oil storage by application of sheet steel with increased values of impact toughness. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 44–49 [in Russian].
13. Broek, D. (1980) *Fundamentals of mechanics of fracture*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
14. Bourga, R., Moore, P., Janin, Y., BN Wang, J. (2015) Leak-before break: Global perspectives and procedures. Review Sharples Int. *J. of Pressure Vessels and Piping*, **2**, 43–49.
15. Trufiyakov, V.I. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
16. Karzov, G.P., Leonov, V.P., Timofeev, B.V. (1982) *Welded pressure vessels*. Moscow [in Russian].
17. DSTU-N B A.3.1-10:2008: *Recommendation for performance of diagnostics of vertical steel tanks* [in Ukrainian].
18. Girenko, V.P., Dyadin, V.P. (1985) Dependence between impact toughness and criteria of fracture mechanics  $\delta_{1c}$ ,  $K_{1c}$  of structural steels and their welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 13–20 [in Russian].
19. DSTU EN 10025-4:2007: Hot rolled products of structural steel. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels (EN 10025-4:2007, IDT).

А. Ю. Барвінко, Ю. П. Барвінко,  
А. М. Яшник, В. М. Мірянін

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЗАСТОСУВАННЯ КРИТЕРІЮ  
«ВИТОК ДО РУЙНУВАННЯ» ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ  
ЛАВИННОГО РУЙНУВАННЯ СТІНКИ  
ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗВАРНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

В роботі розглянуто можливість підвищення працездатності резервуарів для зберігання нафти  $V = 50 \dots 120$  тис. м<sup>3</sup> шляхом



застосування для розрахункових поясів стінки нормалізованої листової сталі 09Г2СЮч-У390 і 09ХГ2СЮч-У440. Експериментально в умовах плоскої деформації на початковому етапі розвитку наскрізної тріщини встановлено зв'язок між довжиною наскрізної втомної тріщини в зварному стиковому з'єднанні досліджуваної сталі і кількістю циклів навантаження смності. На підставі отриманого зв'язку встановлено, що після утворення в зварному з'єднанні стінки наскрізної тріщини і появи витоку нафти є достатній час і умови для її візуального виявлення та вжиття заходів щодо усунення виявленого дефекту. Можливість застосування даного способу виявлення наскрізної тріщини є доказом того, що резервуари з розрахунковими поясами з досліджуваної сталі відповідають критеріям витоку до руйнування. Бібліогр. 19, табл. 5, рис. 4.

**Ключові слова:** резервуари зберігання нафти, втомна тріщина, циклічне навантаження, стикове зварне з'єднання, лавинне руйнування, критерій витоку до руйнування

A. Yu. Barvinko, Yu. P. Barvinko,  
A. N. Yashnik, V. N. Miryanin

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

#### APPLICATION OF LEAK BEFORE BREAK CRITERION FOR PREVENTION OF AVALANCHE FRACTURE OF THE WALL OF VERTICAL STEEL TANKS

The paper deals with the possibility of improving the performance of oil storage tanks with  $V = 50\text{--}120$  thous.  $\text{m}^3$  through application of normalized sheet steel 09G2SYuch-U390 and 09KhG2SYUCH-U440 for design rings of tank wall. A relationship between the length of through-thickness fatigue crack in the butt welded joint of the studied steel and number of tank loading cycles was derived experimentally under the conditions of plane deformation at the initial stage of through thickness-crack propagation. Based on the obtained relationship, it was established that after formation of a through-thickness crack in the welded joint of the wall and appearance of oil leakage, there is sufficient time and conditions for its visual detection and taking measures for elimination of the detected defect. The possibility of application of this method to detect the through-thickness crack is proof of the fact that tanks with design rings from the studied steel satisfy the leak-before-break criterion. 19 Ref., 5 Tabl., 4 Fig.

**Keywords:** oil storage tanks, fatigue crack, cyclic loading, butt welded joint, avalanche fracture, leak before break criterion

Поступила в редакцію 05.03.2018

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ  
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



## Міжнародна конференція «ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»

Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.  
Україна, м. Київ

Голова:  
академік НАН України Л. Лобанов  
НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03150  
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com

# ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВКИ ДИСКРЕТНОЙ ПРИСАДКОЙ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ НА СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ

Ю. М. КУСКОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Использование при наплавке наиболее перспективного наплавочного материала — дискретной присадки — вносит существенное отличие в процессы наплавки с токоподводящим кристаллизатором. Исследовано влияние электрических параметров наплавки на угловую скорость вращения шлаковой ванны при использовании промышленно выпускаемых флюсов трех марок. Установлено, что флюс АНФ-29 позволяет получать достаточно большой вращательный эффект как в период формирования шлаковой ванны, так и в процессе наплавки. Флюс АНФ-32 менее эффективен в период формирования шлаковой ванны. Флюс АН-26 обеспечивает активное вращение шлаковой ванны во время наплавки, но при этом необходимо вводить в ванну повышенную электрическую мощность. На угловую скорость вращения шлаковой ванны влияет как вводимая в шлаковую ванну электрическая мощность, так и ток наплавки, но влияние последнего определяющее. Библиогр.16, табл. 1, рис. 2.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, токоподводящий кристаллизатор, флюсы, шлаковая ванна, угловая скорость вращения шлака, ток наплавки, электрическая мощность, дискретная присадка

Одним из направлений повышения качества электрошлакового металла за счет ускорения тепло-массообменных реакций, улучшения условий кристаллизации жидкого металла является оказание внешнего воздействия на плавильную зону (конец электрода–шлак–металлическая ванна). Это воздействие чаще всего осуществляется механическим [1, 2], электромагнитным [3, 4] и ультразвуковым [5] способами.

Несмотря на то, что большинство исследований подтверждают положительное влияние внешнего воздействия на структуру и свойства наплавленного металла, тем не менее оно не нашло широкого применения, главным образом, за счет усложнения технологии электрошлакового процесса.

Устранить это противоречие можно при использовании в электрошлаковых технологиях разработанного в ИЭС им. Е.О. Патона секционного токоподводящего кристаллизатора (ТПК), одной из основных функций которого является обеспечение при его эксплуатации вращения в горизонтальной плоскости шлаковой ванны [6]. Это вращение осуществляется электромагнитным способом благодаря специальной конструкции токоподводящей секции. В результате взаимодействия продольного магнитного поля кристаллизатора с полями силовых линий рабочего тока внутри шлаковой ванны возникают пондеромоторные силы, которые механически создают в шлаке вращатель-

ный эффект. Вращение шлаковой ванны вследствие сил трения между шлаком и жидким металлом передается металлической ванне.

Помимо отмеченных ранее достигаемых при внешнем воздействии целей при электрошлаковой наплавке (ЭШН) и электрошлаковом переплаве (ЭШП) в ТПК можно решать и другие задачи. В частности, за счет вращения шлака улучшаются условия выравнивания температур во всем объеме шлаковой ванны и ускоряется стабилизация электрошлакового процесса; исключается образование микродуг на границе шлак–неплавящийся электрод (стенка токоподводящей секции), что предотвращает быстрый локальный износ последнего; появляется возможность использования в электрошлаковых технологиях дискретных материалов, равномерно распределяемых по поверхности шлаковой ванны, благодаря чему создаются примерно одинаковые условия плавления в шлаке гранул присадки; активное перемещение шлака относительно наплавляемой поверхности должно положительно влиять на ее качественное соединение с наплавляемым металлом.

Если исходить из требований, предъявляемых к флюсам (шлакам) для ЭШП как наиболее близкого к торцевой ЭШН электрошлакового процесса, то они делятся на две основные группы [7]: технологические и металлургические. К технологическим требованиям относятся: легкость возбуждения и высокая стабильность электрошлакового процесса; возможность получения умеренных скоростей наплавления металла, гаранти-

рующих осевую направленность кристаллизации; минимальный удельный расход электроэнергии; хорошее формирование поверхности наплавляемого металла; легкая отделимость шлаковой корки; постоянство состава шлака при длительном хранении и в процессе ЭШП; минимальная трудоемкость изготовления шлака; отсутствие в составе шлака дорогих и дефицитных компонентов; защита расплавленного металла от доступа воздуха; обеспечение запаса тепла над расплавленным металлом, предупреждающее образование в слитке усадочных раковин и внутренних трещин.

Применительно конкретно к торцевой ЭШН в ТПК следует к этим требованиям добавить следующие: желательное использовать относительно легкоплавкие и «длинные» шлаки; у шлаков должна быть невысокая вязкость и повышенная жидкотекучесть (особенно для случая «жидкого» старта); состав шлаков должен обеспечивать формирование гарнисажа минимальной толщины и повышенной электропроводимости для его «пробивания» в начальный период стабилизации электрошлакового процесса при относительно низком напряжении источника питания.

К металлургическим требованиям относят формирование в наплавленном металле более пластичных неметаллических включений, желательной округлой формы; повышенную десульфуризирующую способность; низкую водородопроницаемость.

Со времени разработки технологии ЭШН и ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе [8, 9] появились различные ее варианты. В настоящее время на базе известной конструкции ТПК предложены четыре технологических способа: наплавка и переплав жидким металлом [10, 11]; так называемая двухконтурная схема переплава электрода с использованием двух источников питания [12]; наплавка с подачей в шлаковую ванну нетоковедущей [13] и токоведущей [14] порошковой проволоки; наплавка по двухконтурной схеме с использованием дополнительного полого графитового электрода и нетоковедущей заготовки (проволоки) [15].

В данной статье мы не рассматриваем достоинства и недостатки вновь предложенных способов наплавки в ТПК. Рассмотрим лишь взаимосвязь способа наплавки и применяемого для него флюса (шлака) с точки зрения возможности осуществления стабильного вращения шлаковой ванны.

Прежде всего следует отметить, что вопросы вращения шлаковой ванны во всех этих способах не рассматриваются, оценивают лишь технологические особенности процесса. Но так как сам электрошлаковый процесс и движение потоков шлака, происходящее при его осуществлении, это единое электрофизикохимическое явление, прежде всего следует понять, из каких соображе-

ний происходит выбор флюса для того или иного предлагаемого способа наплавки (переплава) и насколько критерии этого выбора могут быть использованы для решения поставленной задачи ЭШН дискретной присадкой с обеспечением активного вращения шлаковой ванны.

По имеющейся информации выбор флюса для каждого предложенного способа наплавки либо имеет некоторое обоснование, либо для наплавки просто используют флюс известной марки.

Для наплавки жидким металлом в зависимости от наплавляемого металла применяют флюсы АНФ-94, АНФ-32, АН-75 [10, 11] и различные композиции на основе фторидов и оксидов. Главное отличие ЭШН дискретным материалом от жидкой присадки состоит в том, что в первом случае в шлаковую ванну подаются гранулы холодной присадки, во втором – порции перегретого металла. Соответственно, температурные условия существования шлаковой ванны и физические свойства шлака как в каждой локальной зоне ванны, так и во всем ее объеме в этих технологиях будут отличаться. Поэтому флюс, используемый в одном способе наплавки, не обязательно будет пригоден для другого, особенно с точки зрения создания в шлаковой ванне активного вращательного эффекта.

Что касается наплавки с подачей в шлаковую ванну небольшого объема токоведущей или нетоковедущей проволоки [13, 14], то применение относительно тугоплавкого флюса АНФ-6, по-видимому, не всегда позволяет получить качественное соединение основного и наплавленного металлов, причем сам процесс наплавки, по заявлению разработчиков способа, необходимо вести в узких пределах вводимой электрической мощности. Видимо, по этой причине все последующие работы авторы стали проводить на том же самом флюсе, но с дополнительным вводом в центральную часть шлаковой ванны полого графитового электрода с особой формой рабочего торца [15]. В этом случае весь объем шлаковой ванны (особенно под электродом) достаточно хорошо прогревается. Пока что проверена лишь торцевая наплавка цилиндрических деталей относительно небольшого диаметра 30...90 мм (в основном, диаметр составляет около 30 мм). Возможность применения этого флюса для наплавки изделий большего диаметра и с подачей в шлаковую ванну дискретной присадки вызывает сомнения.

Переплав электродов по двухконтурной схеме [12], как и наплавка жидкой присадкой, позволяет обеспечить в шлаковой ванне более равномерное тепловое поле, что, естественно, не соответствует условиям ЭШН дискретной присадкой. Поэтому



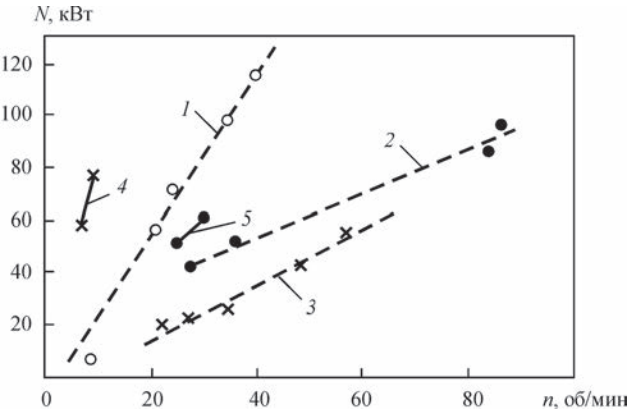


Рис. 1. Влияние на скорость вращения  $n$  шлаковой ванны вводимой в нее электрической мощности  $N$ : 1 — АН-26; 2 — АНФ-29; 3 — АНФ-32; 4 — АНФ-32 ( $L = 94$  мм); 5 — АНФ-29 ( $L = 94$  мм)

для этого способа, по-видимому, требования к выбору флюса будут несколько иные, более жесткие.

Исходя из изложенного выше, а также с учетом ранее выполненных исследований [16], оценку влияния состава флюса на угловую скорость вращения шлаковой ванны проводили на флюсах АНФ-29, АНФ-32 и АН-26. Наряду с установленной технологической возможностью использования этих флюсов необходимо оценить их возможности в качестве жидкой шлаковой среды, способной вращаться в процессе наплавки при подаче на ее поверхность наплавочной дискретной присадки.

Методика выполнения экспериментов была принята аналогичной, описанной в работе [16]. Расстояние от наплавляемой торцевой поверхности заготовки до верхнего торца формирующей секции  $L$  постепенно изменялось от первоначального, равного 94 мм (для флюса АН-26 — 70 мм), до меньших размеров за счет подачи в шлаковую ванну переплавляемой стальной стружки и, соответственно, приращения на торце заготовки наплавленного слоя. Вращение шлаковой ванны в горизонтальной плоскости оценивали путем опускания на ее поверхность небольших кусочков древесного угля и замеров их углового перемещения с помощью секундомера. За результат измерений бралось среднее значение показаний трех-пяти опытов. Большее количество измерений проводилось при низких скоростях вращения ванны (пониженное теплонасыщение шлака) из-за образования на ее поверхности локальных зон охлаждения, мешающих стабильному вращению кусочков угля.

Отдельно оценивали влияние на вращение шлаковой ванны вводимой в нее электрической мощности  $N$  и тока наплавки  $I$ . Результаты измерений представлены на рис. 1 и 2.

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы.

Для флюсов АНФ-29 и АНФ-32, имеющих относительно близкий химический состав, измене-

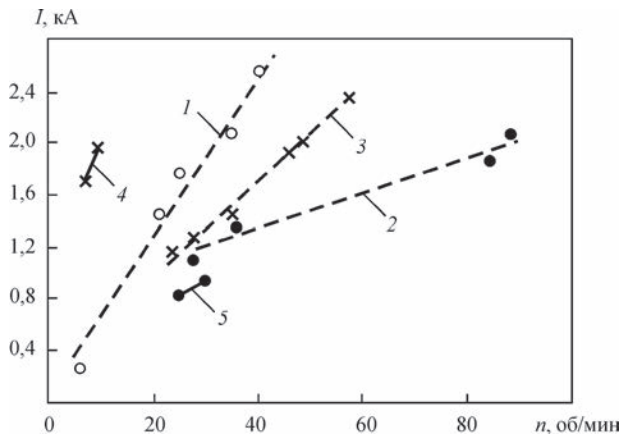


Рис. 2. Влияние на скорость вращения  $n$  шлаковой ванны тока наплавки  $I$  (обозначения те же, что и на рис. 1)

ние скорости вращения шлака  $n$  от величины вводимой в шлаковую ванну электрической мощности  $N$  на этапе ее формирования и стабилизации электрошлакового процесса ( $L = 94$  мм) заметно отличается (см. рис. 1). У флюса АНФ-29 прямая зависимость  $N$ - $n$  примерно соответствует прямо пропорциональному соотношению (при изменении  $N$  с 50 до 60 кВт  $n$  изменяется с 25 до 30 об/мин). В то время, как у флюса АНФ-32, в этих же условиях (IV ступень источника,  $L = 94$  мм) выполнения эксперимента изменение мощности с 60 до 80 кВт (около 33 %) приводит к изменению угловой скорости вращения шлаковой ванны с 7 до 9 об/мин (приблизительно 29 %).

После достижения минимальных значений  $L$  (за счет подачи в шлаковую ванну стружки и прироста наплавленного слоя), соответственно, для АНФ-29 — 22 мм, АНФ-32 — 28 мм и АН-26 — 25 мм осуществляли постепенный переход с IV ступени источника питания на более низкие ступени (III и II). При этих величинах  $L$  наклон прямых флюсов АНФ-29 и АНФ-32 становится примерно одинаковым. Зависимость  $N$ - $n$  для флюса АН-26 характеризуется более резким изменением  $n$  при снижении вводимой электрической мощности.

Как отмечалось выше, возникновение и скорость вращения шлаковой ванны определяется, главным образом, рабочими токами наплавки. И хотя характер прямых зависимостей  $N$ - $n$  и  $I$ - $n$  примерно одинаков (см. рис. 1, 2), но влияние со-

**Влияние доли тока  $I$  (%) в вводимой в шлаковую ванну электрической мощности  $N$  на скорость вращения шлаковой ванны  $n$**

Флюс	Режим наплавки		$n$ , об/мин	Доля $I$ в $N$ , %
	$I$ , кА	$N$ , кВт		
АНФ-29	1,34	52,4	36	2,64
	0,82	50,8	25	1,56
АНФ-32	2,00	44,0	48	4,55
	1,93	42,5	46	4,54
АН-26	2,06	98,9	40	2,08
	1,77	72,9	24	2,43

ставляющей тока в вводимой в шлак различного химического состава электрической мощности можно оценить исходя из следующих данных (таблица).

### Выводы

1. Обеспечение оптимального вращения шлаковой ванны как в начальный период ее формирования (характеризуется временем, необходимым для минимального углового движения расплава по периметру кристаллизатора), так и при стабилизации электрошлакового процесса (неизменность величины тока наплавки до подачи в шлаковую ванну присадки, постоянная скорость вращения ванны, быстрое погружение присадки в шлаковую ванну без образования на ее поверхности конгломератов шлака и наплавочного материала) является важной характеристикой флюсов, применяемых для ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе.

2. Угловая скорость вращения шлаковой ванны зависит как от электрической мощности, вводимой в нее при осуществлении электрошлакового процесса в ТПК, так и непосредственно от рабочего тока наплавки. При этом наиболее существенную роль в этом влиянии играет ток наплавки.

3. Из трех рассмотренных в экспериментах флюсов наилучшие условия для осуществления вращения шлаковой ванны могут быть получены при использовании флюса АНФ-29. Шлаковая ванна, получаемая при расплавлении флюса АНФ-29, позволяет достичь достаточно большого вращательного эффекта как в период формирования шлаковой ванны, так и в процессе наплавки. Флюс АНФ-32 близок к флюсу АНФ-29 по своей способности к вращению шлаковой ванны в период ведения стабильного электрошлакового процесса, но менее эффективен в период формирования шлаковой ванны. Флюс АН-26 может обеспечить активное вращение шлаковой ванны во время наплавки, но требует для этого введения в нее повышенной электрической мощности.

### Список литературы

1. Вачугов Г. А., Чуманов В. И., Хасин Г. А. и др. (1975) Влияние вращения переплавляемого электрода на процесс электрошлакового переплава. *Спец. электрометаллургия*, **28**, 31–36.
2. Кодама Х., Кандро И., Акахори К. и др. (1987) Свойства плакированных валков, полученных методом электрошлаковой наплавки с вращением. *Электрошлаковый переплав. Материалы VIII международной конференции по вакуумной металлургии, специальным видам наплавки и металлургическим покрытиям*, **9**, сс. 139–145.
3. Максимович Б. И. (1962) Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов. *Электротермия*, **5**, 9–12.
4. Топилин В. В., Клюев М. М., Фомичева Н. П., Гребцов Ю. Г. (1968) Измельчение макроструктуры слитков при электрошлаковом переплаве сплавов. *Спец. электрометаллургия*, **1**, 23–28.

5. Куделькин В. П., Клюев М. М., Филиппов С. И. и др. (1969) Воздействие ультразвуковых колебаний на кристаллизацию при электрошлаковом переплаве. *Изв. вузов. Черная металлургия*, **11**, 64–70.
6. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спец. электрометаллургия*, **2**, 33–40.
7. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. (1988) *Сварочные шлаки. Справочное пособие*. Киев, Наукова думка.
8. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1964) *Токоподводящий кристаллизатор*. СССР, А. с. 264427.
9. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1969) *Устройство для электрошлакового переплава*. СССР, А. с. 337026.
10. Кусков Ю. М. (1969) Электрошлаковая наплавка цилиндрических заготовок жидким присадочным материалом в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **6**, 52–53.
11. Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 6–11.
12. Цыкуленко А. К., Лакуман И. А., Медовар Л. Б. и др. (2000) Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходомерного электрода. *Там же*, **3**, 16–20.
13. Соколов Г. Н., Лысак В. И. (2005) *Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего формирования сталей*. Волгоград, РПК «Политехник».
14. Соколов Г. Н., Зорин И. В., Пурихин С. Н. (2004) Технология ЭШН оправок трубопрокатного агрегата. *Сварщик*, **1**, 15.
15. Соколов Г. Н. (2007) *Формирование композиционной структуры наплавленного металла для работы в условиях термошлакового воздействия и разработка технологии ЭШН прессовых штампов и инструмента*. Автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. Волгоград.
16. Кусков Ю. М. (2018) Влияние состава флюса на процесс торцевой электрошлаковой наплавки с отдельной подачей присадочного материала. *Автоматическая сварка*, **1**, 44–49.

### References

1. Vachugov, G.A., Chumanov, V.I., Khasin, G.A. et al. (1975) Influence of rotation of remelted electrode on electros slag remelting process. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **28**, 31–36 [in Russian].
2. Kodama, H., Kandrov, I., Akahori, K. et al. (1987) Properties of clad rolls produced by method of electros slag surfacing with rotation. In: Proc. of 8th Intern. Conf. on Vacuum Metallurgy, *Special Kinds of Surfacing and Metallurgical Coatings*, **9**, 139–145.
3. Maksimovich, B.I. (1962) Effect of electromagnetic rotation of slag pool on crystallization of metal in electros slag remelting of high-alloy steels and alloys. *Elektrotermiya*, **5**, 9–12 [in Russian].
4. Topilin, V.V., Klyuev, M.M., Fomicheva, N.P., Grebtsov, Yu.G. (1968) Refining of macrostructure of ingots in electros slag remelting of alloys. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 23–28 [in Russian].
5. Kudelkin, V.P., Klyuev, M.M., Filippov, S.I. et al. (1969) Impact of ultrasonic oscillations on crystallization in electros slag remelting. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **11**, 64–70 [in Russian].
6. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold insuring rotation of slag pool. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 33–40 [in Russian].
7. Podgaetsky, V.V., Kuzmenko, V.G. (1988) *Welding fluxes: Refer. book*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1964) *Current-supplying mold*. USSR author's cert. 264427 [in Russian].
9. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1969) *Device for electros slag remelting*. USSR author's cert. 337026 [in Russian].

10. Kuskov, Yu.M. (1969) Electroslag surfacing of cylindrical billets with liquid filler material in current-supplying mold. *Avtomatich.Svarka*, **6**, 52-53 [in Russian].
11. Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1995) Electroslag surfacing with liquid filler metal. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 6-11 [in Russian].
12. Tsykulenko, A.K., Lakuman, I.A., Medovar, L.B. et al. (2000) Two-loop circuit of electroslag remelting of consumable electrode. *Ibid.*, **3**, 16-20 [in Russian].
13. Sokolov, G.N., Lysak, V.I. (2005) *Surfacing of wear-resistant alloys on press tools and instruments for hot forming of steels*. Volgograd, RPK Politekhnik [in Russian].
14. Sokolov, G.N., Zorin, I.V., Tsurikhin, S.N. (2004) Technology of electroslag surfacing of mandrels of tube-rolling unit. *Svarshchik*, **1**, 15 [in Russian].
15. Sokolov, G.N. (2007) Formation of composite structure of deposited metal for operation in thermoslag impact conditions and development of ESS of press tools and instruments. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree*. Volgograd [in Russian].
16. Kuskov, Yu.M. (2018) Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *The Paton Welding J.*, **1**, 33-37.

Ю. М. Кусков

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПЛАВЛЕННЯ ДИСКРЕТНОЮ ПРИСАДКОЮ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ НА ШВИДКІСТЬ ОБЕРТАННЯ ШЛАКОВОЇ ВАННИ

Використання при наплавленні найбільш перспективного наплавного матеріалу — дискретної присадки — вносить суттєву відмінність даного процесу від відомих, що застосовують струмопідвідний кристалізатор. Досліджено вплив електричних параметрів наплавлення на кутову швидкість обертання шлакової ванни при використанні флюсів трьох марок, що промислово випускаються. Встановлено, що флюс АНФ-29 дозволяє отримувати досить великий обертальний ефект як в період формування шлакової ванни, так і в процесі наплавлення. Флюс АНФ-32 менш ефективний в період формування

шлакової ванни. Флюс АН-26 забезпечує активне обертання шлакової ванни під час наплавлення, але при цьому необхідно вводити в ванну підвищену електричну потужність. На кутову швидкість обертання шлакової ванни впливає як електрична потужність, що вводиться в шлакову ванну, так і струм наплавлення, але вплив останнього визначальний. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 2.

**Ключові слова:** електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, флюси, шлакова ванна, кутова швидкість обертання шлаку, ток наплавлення, електрична потужність, дискретна присадка

Yu.M. Kuskov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### INFLUENCE OF ELECTRIC PARAMETERS OF SURFACING WITH DISCRETE FILLER IN CURRENT-SUPPLYING MOULD ON VELOCITY OF SLAG POOL ROTATION

Application of the most promising surfacing material — discrete filler makes a significant difference in the processes of surfacing with current-supplying mould. Influence of surfacing current and electric power applied to the slag pool, on its angular velocity of rotation at application of three commercial flux grades was studied. It is found that ANF-29 flux allows producing a sufficiently large rotating effect both during the period of slag pool formation, and during surfacing. ANF-32 flux is less effective during the period of slag pool formation. AN-26 flux provides active rotation of the slag pool during surfacing, but this requires applying higher electric power to the pool. Angular velocity of slag pool rotation is affected both by electric power applied to the slag pool, and surfacing current, but the latter has a determinant influence. 16 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

**Keywords:** electroslag surfacing, current-supplying mould, fluxes, slag pool, angular velocity of slag rotation, surfacing current, electric power, discrete filler

Поступила в редакцию 12.01.2018



#### Международный балтийский форум DVS и GSI «Мобильность через постоянное обучение и четвертая промышленная революция «Индустрия 4.0»

7–8 июня 2018

г. Таллинн

#### Тематика

- Новые директивы Международного института сварки по квалификации сварочного надзорного персонала. Новые цели обучения и компетентность
- Вопросы квалификации специалистов в области технологий соединения с учетом конкретных требований к сварке и склеиванию
- Индустрия 4.0
- Инновационное производство

Контакты: Лариса Кантор, e-mail: larissa.kantor@qsi-boltikum.ee



## СОВРЕМЕННЫЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СВАРЩИКОВ

Л. М. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, Н. М. МАХЛИН<sup>2</sup>, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ<sup>1</sup>, В. Е. ВОДОЛАЗСКИЙ<sup>2</sup>, В. Ю. БУРЯК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: [electro@paton.kiev.ua](mailto:electro@paton.kiev.ua)

В работе представлены результаты разработки технических средств полувиртуального типа для подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства, выполненных в НИЦ СКАЭ совместно с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и ИПМЭ им. Г. Е. Пухова НАН Украины. Рассмотрен достигнутый к настоящему времени уровень развития технических средств обучения и аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства, позволяющий прогнозировать расширение областей применения современных информационных технологий, в том числе по воспроизведению смешанной реальности с максимальной адаптацией виртуального пространства к реальному сварочному оборудованию и обеспечивающих удаленный доступ телекоммуникационных систем. Показано, что упрощение подготовки и приближение ее к условиям реальных процессов сварки возможно применением нового поколения сварочных тренажеров, в которых широко используются современные информационные технологии. Библиогр. 15, рис. 3.

*Ключевые слова:* виртуальная реальность, информационные технологии, дуговые сварочные тренажеры, обучение, сварочное оборудование, аттестация сварщиков

Технические средства подготовки (тренажеры) могут быть классифицированы по способу сварки, условиям его реализации, степени имитации реального процесса и инструментов.

По степени имитации процесса сварки все технические средства подготовки можно подразделить на [1, 2]:

компьютерные тренажеры, в которых имитация зоны сварки и сварочной дуги осуществляется в виртуальном пространстве средствами машинной графики и синтеза изображений;

тренажеры, обеспечивающие имитацию процесса сварки малоамперной дугой без плавления электрода и образования сварочной ванны;

тренажеры с использованием элементов реального процесса сварки и сварочного оборудования.

В настоящее время на мировом рынке учебного оборудования и технических средств подготовки сварщиков представлены тренажеры всех трех типов.

Для компьютерных тренажеров (в основном, разработки и производства фирм из США, стран ЕС, Канады, Австралии, Японии), ярким примером которых может служить продукция компании «SOL-DAMATIC» (Испания), характерна максимальная степень использования виртуальных эффектов при имитации процесса сварки [3–8]. В тренажерах этого типа воспроизведение сварочной обстановки – зоны горения дуги, разделки кромок, шва и жидкой ванны – осуществляется путем их изображения на дисплее персонального компьютера (ПК) или на экране специального сварочного шлема со встроен-

ными очками виртуальной реальности. Однако компьютерным тренажерам присущ ряд недостатков, ограничивающих их возможности:

- отсутствие четкой взаимосвязи между параметрами процесса сварки, сварными соединениями и сварочными инструментами, которые средствами машинной графики могут быть отображены только условно;

- неизбежность использования системы специальных сенсоров и специальных сварочных шлемов или аналогичных устройств со встроенными очками виртуальной реальности, а также наличия коммуникаций, обеспечивающих их соединение с ПК или подобными процессорами, что создает определенные неудобства для обучаемых и ограничивает возможности их перемещения в пространстве;

- необходимость в подготовительных операциях по установке пределов отклонений от нормативных значений параметров процесса сварки;

- необходимость последующей адаптации к реальным сварочным инструментам и процессам;

- затруднения в процессе выработки у обучаемых, не имеющих первоначальной подготовки, необходимых профессиональных психомоторных навыков;

- высокая стоимость (от € 7000).

По мнению многих специалистов наиболее широкими функциональными и дидактическими возможностями характеризуются тренажеры второго и третьего типов, обеспечивающих приближение процесса обучения к условиям реального

процесса сварки, малоамперные и дуговые тренажеры сварщика [1, 9].

Основной особенностью малоамперных дуговых тренажеров является максимальное приближение имитируемого процесса сварки к реальному благодаря существованию малоамперной дуги, ток которой составляет 4...6 А, а мощность не превышает 250 В·А, вследствие чего в имитаторе свариваемого изделия образуется зона термического влияния без плавления основного и электродного металлов.

Малоамперные дуговые тренажеры представляют собой аппаратно-программные комплексы, в которых предусмотрено непосредственное измерение и оценивание с помощью ПК таких непрерывно изменяющихся во времени параметров процесса сварки, как ток, напряжение и длина дуги, скорость сварки, углы наклона имитатора электрода сварочного инструмента относительно имитатора свариваемого изделия. Непосредственные измерения в малоамперных дуговых тренажерах выполняются с помощью системы входящих в их состав датчиков различной физической природы. Пропорциональные параметрам процесса сварки сигналы с информационных выходов этих датчиков поступают на входы многоканального согласующего модуля тренажера, осуществляющего частотную коррекцию и приведение в соответствие уровней входных сигналов диапазону входных напряжений аналого-цифрового преобразователя (АЦП). С выходов каналов согласующего модуля нормализованные аналоговые сигналы подаются на входы многоканального АЦП, обеспечивающего преобразование входных аналоговых сигналов в цифровой код, подаваемый на шину данных ПК для дальнейшей обработки и анализа.

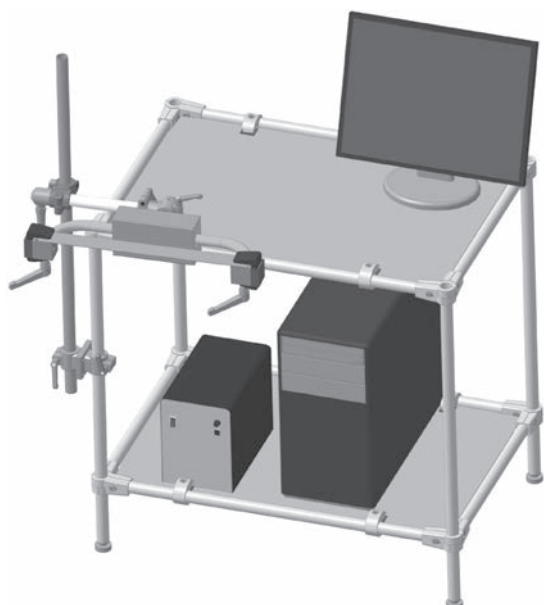


Рис. 1. Упрощенный общий вид тренажера МДТС-05М1 модификации ОБЦ 650 УХЛ4.2

Результатом непосредственной обработки поступивших в ПК сигналов является информация (отображаемая в числовом, графическом или табличном виде) о текущих значениях протекающих в сварочном контуре и составляющих его цепях токов, напряжения дуги, длины дугового промежутка, углов наклона электрода имитатора сварочного инструмента. Математическая обработка поступивших в ПК данных позволяет также получить информацию о текущих значениях скорости сварки, эффективной тепловой мощности дуги и погонной энергии. Полученные в результате обработки поступивших в ПК данных текущие значения параметров сварки сравниваются с их граничными значениями, заданными перед началом сеанса обучения. В случае выхода текущего значения контролируемого параметра за регламентированные учебным заданием области ПК автоматически вырабатывает звуковые речевые сигналы обратной связи с обучаемым, воспроизводимые с помощью аудиосредств, например, головных телефонов.

Среди известных образцов и моделей малоамперных дуговых тренажеров сварщика в настоящее время наиболее широкие функциональные, технологические и дидактические возможности имеет разработанный и изготавливаемый в НИЦ СКАЭ малоамперный дуговой тренажер сварщика МДТС-05М1, позволяющий моделировать и имитировать процессы ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММА), сварки неплавящимся электродом (TIG) и сварки плавящимся электродом (MIG/MAG). Несколько упрощенный общий вид тренажера МДТС-05М1 модификации ОБЦ 650 УХЛ4.2 приведен на рис. 1, а основные параметры тренажера МДТС-05М1 приведены ниже.

**Основные параметры тренажера МДТС-05М1**

Ток сварочной дуги, А .....	4,5±0,3
Напряжение холостого хода, В, не более.....	65
Число информационных каналов блока технологического интерфейса БТИ-05М1 ОБЦ 650.05.00.000 .....	6
Разрядность встроенного в блок технологического интерфейса БТИ-05М1 ОБЦ650.05.00.000 аналого-цифрового преобразователя, бит, не менее.....	11
Контролируемые и задаваемые параметры режима сварки:	
скорость сварки (скорость перемещения электрода), мм/с.....	2...12
длина дугового промежутка:	
в режиме имитации сварки плавящимся электродом, мм .....	1...6
в режиме имитации сварки неплавящимся электродом, мм .....	0,5...4,0
углы наклона электрода поперек и вдоль шва, град .....	±85
погонная энергия, Дж/мм .....	11...50
напряжение дуги, В.....	20...45
средняя скорость движения электрода при ручной дуговой сварке (в режиме имитации плавления электрода), мм/с .....	4,0±1,0
темп подачи присадочной проволоки в зону сварки	

(сварочной дуги), мин <sup>-1</sup> .....	10...20
длительность сеанса обучения, с.....	90, 180, 240, 360
Номинальное напряжение питающей однофазной сети переменного тока частотой 50 Гц, В.....	220
Потребляемая электрическая мощность (без учета мощности, потребляемой компьютером и его перифе- рийными устройствами), кВт·А, не более.....	0,35

Тренажер МДТС-05М1 обеспечивает возможность освоения навыков возбуждения дуги и поддержания ее в технологически обоснованном диапазоне длины, равномерного перемещения дуги по заданной траектории, а также поддержания угла наклона электрода к свариваемой поверхности, обеспечения регламентированного теплового режима сварочной ванны. При TIG-сварке возможно дополнительное освоение техники подачи присадочного материала в сварочную ванну.

Важной составной частью программного обеспечения (ПО) тренажера МДТС-05М1 является учебно-методическая документация (УМД), включающая программу обучения, тестовую программу, библиотеку теоретического материала по реализуемым процессам сварки и библиотеку справочных данных, содержащую типы и размеры характерных сварных соединений, а также виды основных дефектов в этих соединениях.

Технические решения, возможности аппаратной части, информационные ресурсы и построение, в том числе методическое, ПО тренажера МДТС-05М1 обусловили его широкое применение как технического средства обучения персонала сварочного производства в учебных заведениях профессионального образования и учебных центрах подготовки и повышения квалификации сварщиков Украины, России, Казахстана, Македонии, Беларуси и других стран. Только в России в эксплуатации находятся более 1200 тренажеров данного типа, при этом в ряде образовательных заведений, учебных и аттестационных центров РФ на базе тренажеров МДТС-05М1 созданы целые тренажерные классы и лаборатории для подготовки сварщиков MMA-, TIG- и MIG/MAG-сварки. Опыт применения тренажера МДТС-05М1 подтверждает его высокую эксплуатационную надежность, экономичность и эф-

фективность как для профессионального отбора и начальной профессиональной подготовки сварщиков, так и для повышения их квалификации, производственного тренажа и тестирования, а в ряде случаев — и для допускового контроля.

Традиционный подход к обучению сварщиков с использованием реальных процессов сварки связан со значительным расходом металла, сварочных материалов и электроэнергии. Интенсифицировать и качественно усовершенствовать процесс обучения навыкам и умениям с одновременным сокращением операционных издержек возможно только с применением аппаратно-программных средств высокого научно-технического уровня, обеспечивающих совмещение действительной и виртуальной реальности. В наибольшей степени такому подходу соответствует разработанный и изготавливаемый в НИЦ СКАЭ и не имеющий аналогов тренажер сварщика дуговой сварки ТСДС-06М1.

Тренажер ТСДС – 06М1 обеспечивает:

- масштабное воспроизведение реальных процессов дуговой сварки;
- измерение мгновенных и усредненных значений параметров процессов со сравнением возможных отклонений от заданных или нормативных значений в динамике;
- компьютерную регистрацию и обработку полученной информации, ее документирование, хранение и воспроизведение в цифровом, графическом или табличном виде;
- осуществление обратной связи с обучаемым (тестируемым);
- автоматическое и однозначное оценивание действий и навыков обучаемого или тестируемого сварщика при реализации процессов сварки.

По структурному построению тренажер ТСДС-06М1 во многом схож с тренажером МДТС-05М1, однако отличается от последнего количеством и параметрами датчиков измерительной системы и схемно-конструктивными решениями. Общий вид тренажера ТСДС-06М1 показан на рис. 2, а его основные параметры приведены ниже.

#### Основные параметры тренажера сварщика дуговой сварки ТСДС-06М1

Номинальный сварочный ток модуля энергетического, А .....	300
Продолжительность нагрузки (ПН) при номинальном сварочном токе и длительности цикла $T_{ц} = 5$ мин, % .....	60
Напряжение холостого хода, В, не более.....	65
Напряжение питающей однофазной сети частотой 50/60 Гц, В .....	220±33
Контролируемые и задаваемые параметры:	
сварочный ток (установочно, с точностью ±5А):	
при MMA-сварке, А .....	80, 100, 120, 140, 160, 180
при TIG-сварке, А .....	80, 100, 120, 140
при MAG-сварке, А.....	125±10
напряжение дуги:	
при MMA-сварке, В .....	21...28

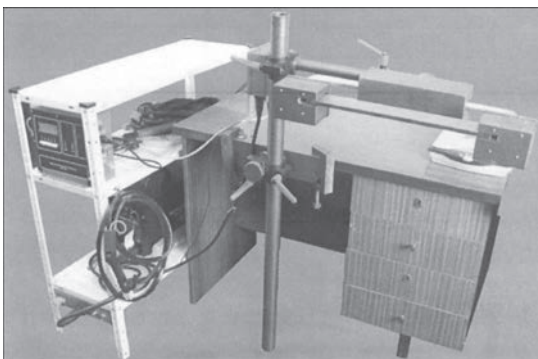


Рис. 2. Общий вид тренажера ТСДС-06М1



при TIG-сварке, В.....	9...16
при MAG-сварке, В.....	20...22
длина дугового промежутка:	
при MMA-сварке, мм.....	2...5
при TIG-сварке, мм.....	0,5...4,0
скорость подачи электродной проволоки при	
MAG-сварке, мм/с (м/ч).....	2,92...3,33 (105...120)
углы наклона электрода сварочного инструмента	
(в нижнем и потолочном положениях сварного образ-	
ца), град.....	
±(45±5)	
скорость сварки:	
при MMA-сварке, мм/с (м/ч).....	1...5 (3,6...18,0)
при TIG-сварке, мм/с (м/ч).....	0,5...2,5 (1,8...9,0)
при MAG-сварке, мм/с (м/ч).....	4,0...5,5 (15,0...20,0)
погонная энергия:	
при MMA-сварке, Дж/мм.....	70...410
при TIG-сварке, Дж/мм.....	60...300
при MAG-сварке, Дж/мм.....	80...120
расход инертного газа (аргона) при TIG-сварке,	
л/мин.....	5,5...12,0
длительность сеанса обучения (тестирования), с.....	
90, 180,	
240, 360	
Электрическая мощность, потребляемая модулем	
энергетическим, кВт·А, не более.....	
5,0	
Количество информационных каналов блока техно-	
логического интерфейса БТИ-06М (ОБЦ 611М.05.00.000).....	
8	
Разрядность каждого канала встроенного в блок техно-	
логического интерфейса БТИ-06М (ОБЦ 611М.05.00.000)	
аналого-цифрового преобразователя, бит, не менее.....	
12	
Потребляемая электрическая мощность (без учета	
мощности, потребляемой модулем энергетическим,	
компьютером и его периферийными устройствами),	
кВт·А, не более.....	
0,50	

В состав тренажерного комплекса ТСДС-06М1 входят энергетический модуль питания дуги, блок технологического интерфейса, позиционер, ПК с периферийными устройствами, комплект сварочных инструментов, защитная маска со светофильтром, комплект сварочных образцов, головные телефоны (наушники), стеллаж облегченной конструкции для размещения в нем энергетического модуля питания дуги, блока технологического интерфейса и принадлежностей тренажера, а также специализированное ПО. В качестве энергетического модуля питания дуги могут быть использованы с небольшими доработками стандартные, специализированные или универсальные сварочные источники питания преимущественно инверторного типа. Позиционер тренажера ТСДС-06М1 обеспечивает закрепление сварочного образца в токоподводах позиционера; возможность установки сварочного образца в различные пространственные положения; реализацию специальной схемы подключения сварочного образца к одному из полюсов сварочного источника питания; формирование сигналов, пропорциональных протекающим в сварочном образце токам; возможность калибровки контура измерений токов, протекающих в сварочном образце. В комплект сварочных инструментов тренажера ТСДС-06М1 входят

ручные инструменты сварщика на основе широко распространенных стандартных электрододержателя для MMA-сварки, горелки для TIG-сварки и горелки для MIG/MAG-сварки. Сварочные инструменты оснащены трехкоординатным датчиком угловых положений электрода относительно вектора гравитации. Комплект сварочных образцов тренажера ТСДС-06М1 содержит пластинчатые образцы для выполнения стыковых и угловых швов, а также неповоротных стыков труб и других тел вращения. Форма и геометрические размеры сварочных образцов обеспечивают их многогранное использование при обучении, тестировании, допусчном контроле или предаттестационной подготовке. Эти же образцы могут быть использованы и для процедуры аттестации сварщиков.

ПО тренажерного комплекса ТСДС-06М1, как и ПО тренажера МДТС-05М1, выполнено на платформе LabVIEW, что обеспечивает возможность:

- ввода исходных данных сварки в диалоговом режиме;
- отображения на дисплее ПК контролируемых параметров;
- осуществления обратной связи с обучаемым (тестируемым) путем автоматической подачи речевых сигналов («подсказок»);
- контроля процесса сварки в целом и по отдельным параметрам;
- проведения статистической обработки результатов сеанса тренажа, тестирования, допусчного контроля или аттестационных испытаний;
- получения оценки уровня навыков техники сварки и качества работ за счет наличия элементов экспертной системы;
- документирования результатов сеанса обучения (тестирования, допусчного контроля или аттестационных испытаний);
- передачи текущей информации в режиме «on-line» по каналам стандартных информационных систем и сетей (например, сети Интернет);
- дистанционного установления требований к тестированию, допусчному контролю или аттестационным испытаниям.

В состав ПО тренажера ТСДС-06М1 входят программы обучения, тестирования и допусчного контроля сварщиков и соответствующая УМД, которая адресована не только сварщикам, непосредственно выполняющим сварочные работы, но и другим специалистам сварочного производства. При необходимости ПО тренажера ТСДС-06М1 может быть дополнено и программой аттестации сварщиков дуговой сварки.

Учебная программа (программа обучения) построена на основе репродуктивного метода, имеет иерархическую структуру и представляет собой двухуровневую систему практических занятий.

Основной целью занятий первого, локального, уровня является достижение обучаемым стабильных результатов по формированию отдельных навыков ведения реальных процессов MMA-, TIG- и MIG/MAG-сварки, причем эти результаты должны соответствовать предварительно заданным значениям параметров сварочного процесса и техники сварки. Цель второго, комплексного, уровня занятий — достижение и поддержание совокупности сформировавшихся на локальном уровне навыков и умений, обеспечивающей стабильную повторяемость выполнения реальных процессов сварки в целом с заданным уровнем качества.

Следует подчеркнуть, что автоматическое определение координат пятна сварочной дуги и фактической скорости сварки при овладении навыками поддержания в заданных пределах скорости сварки (скорости перемещения электрода) являются одними из наиболее существенных составляющих профессиональной подготовки сварщиков. Обеспечение достоверного контроля этих составляющих представляет собой одну из сложных и все еще недостаточно решенных задач при построении дуговых тренажерных сварочных систем (ТСС). И хотя существует ряд способов оценки скорости ручной сварки и устройств для их реализации [2, 10, 11], однако множественные попытки применить эти способы в силу их технических или экономических аспектов не привели к желаемому результату, соответствующему требованиям к современным ТСС. Это обусловило проведение в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ исследований, теоретических и экспериментальных работ по поиску простых в реализации, недорогих и удовлетворяющих по точности способов определения координат перемещающейся дуги и оценивания скорости сварки, а также принципов построения устройств для осуществления таких способов. В результате упомянутых исследований и работ был разработан сравнительно легко осуществимый резистометрический способ определения координат перемещающейся дуги и оценивания скорости сварки, а также устройства для его реализации [12, 13]. В основу этого способа положен разработанный В. В. Васильевым и Л. А. Симак в ИПМЭ им. Г. Е. Пухова метод определения координат измерительного зонда в проводящей среде [14, 15], развитый в ИЭС им. Е. О. Патона и НИЦ СКАЭ для дуговых ТСС применительно к перемещающемуся пятну сварочной дуги или ее имитатора. Учитывая преимущества резистометрического способа определения линейной координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки, этот способ и цифровые устройства для его реализации успешно использованы во всех современных аппаратно-программных тренажерных комплексах (сва-

рочных тренажерах) серий МДТС и ТСДС и широко представленных в Украине и в ряде стран ближнего и дальнего зарубежья.

Поскольку тренажерные комплексы МДТС-05М1 и ТСДС-06М1 полностью совместимы с современными цифровыми каналами и системами передачи, хранения, приема и воспроизведения информации (включая Интернет), то появляется возможность осуществления на их основе не только дистанционного обучения сварщиков (в том числе с использованием реальных процессов сварки), но и дистанционного тестирования, аттестации и сертификации персонала сварочного производства. Такие возможности единого информационного пространства позволят международным и национальным центрам сертификации персонала не только фиксировать протоколы тестирования, допускного контроля и аттестации, но и контролировать их проведение, соответствие знаний и умений обучаемых (тестируемых) национальным и международным требованиям. Одновременно за счет пополнения УМД нормами международных образовательных стандартов и правил упрощается учет их специфики при предаттестационной подготовке. При этом непосредственно процедуры тестирования, допускного контроля и аттестации персонала можно выполнять в учебных или аттестационных центрах, находящихся на значительных (практически любых) расстояниях от сертификационных центров, выдающих разрешительные документы.

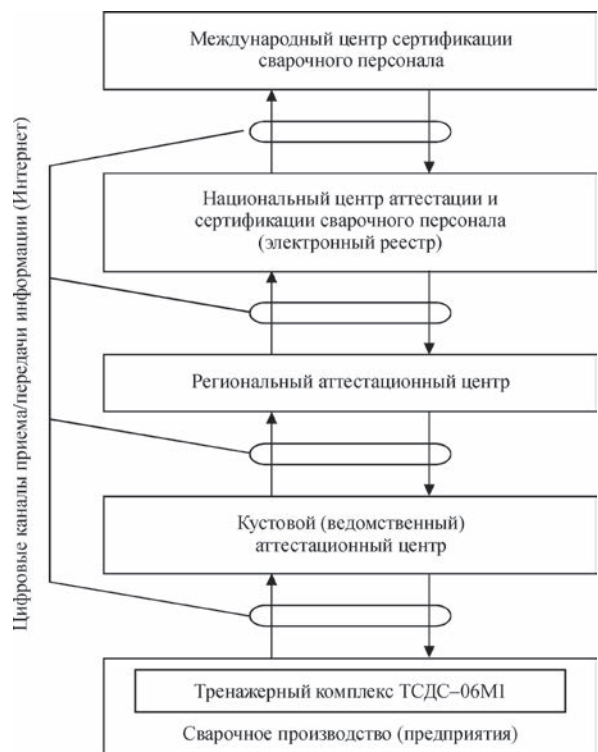


Рис. 3. Структурная схема системы дистанционной аттестации и сертификации сварочного персонала (с использованием тренажера ТСДС-06М1)

Схема системы дистанционной аттестации и сертификации сварочного персонала приведена на рис. 3.

Необходимо особо отметить, что модернизация существующих тренажерных систем и дальнейшее развитие дополнительных средств обучения сварщиков и специалистов сварочного производства возможны лишь на основе анализа и обобщения практического опыта применения таких технических средств обучения и аттестации в заведениях и учреждениях профессионального образования всех уровней, учебных и аттестационных центрах, а также непосредственно на производстве.

Накопленный опыт практического применения информационных технологий и разработанных в последние десятилетия технических средств в обучении, повышении квалификации и аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства создает благоприятные предпосылки решения насущных задач подготовки соответствующего современным требованиям сварочного персонала в странах СНГ и в других странах.

### Выводы

1. Дуговые аппаратно-программные комплексы (сварочные тренажеры) с использованием информационных технологий, созданные в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ, обеспечивают расширение технологических и дидактических возможностей современных технических средств подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства, интенсификацию и упрощение процесса обучения и его приближение к условиям реальных процессов сварки.

2. Достигнутый к настоящему времени уровень развития технических средств профессионального отбора, обучения, повышения квалификации, тестирования, допускного контроля и аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства позволяет прогнозировать расширение областей применения современных информационных технологий, в том числе по воспроизведению смешанной реальности с максимальной адаптацией виртуального пространства к реальному сварочному оборудованию, а также применение телекоммуникационных систем, обеспечивающих удаленный доступ через глобальные сети.

3. При создании сварочных тренажеров нового поколения опережающее развитие будут получать технологии виртуальной реальности, совмещенные с реальным сварочным оборудованием, реальными сварочными инструментами и имитаторами свариваемых изделий, позволяющие создавать практически любую учебную обстановку с поддержкой режима реального времени и эффективной системой оценки действий обучаемых,

при этом представляется, что в сварочных тренажерах нового поколения найдут широкое применение микропроцессорные устройства и системы, а также цифровые системы технического зрения.

В заключение авторы считают необходимым отметить, что в разработке и внедрении аппаратно-программных комплексов (сварочных тренажеров) МДТС-05М1 и ТСДС-06М1 приняли участие В. Л. Кобрянский, А. Г. Скирта, И. В. Вертецкая, М. И. Скопюк, А. Ф. Мужиченко, А. Г. Сипаренко, В. А. Богдановский, В. М. Гавва, А. Д. Чередник, В. Е. Попов, Д. С. Олияненко, А. А. Муха, С. Ф. Тархов, В. А. Федотов, а в освоении промышленного изготовления этих тренажеров А. А. Свириденко, Н. М. Пасичный, В. Н. Андрейченко, В. Е. Иванов, А. У. Мнухин, В. П. Тищенко, Г. И. Писарев, А. В. Науменко.

### Список литературы

1. Патон Б. Е., Коротынский А. Е., Богдановский В. А. и др. (2010) Информационные технологии при подготовке сварщиков и специалистов сварочного производства: методология и технические средства. *Сварка и Диагностика*, 3, 37–44.
2. Васильев В. В., Симак Л. А., Богдановский В. А. и др. (2003) *Имитационное моделирование и тренажерно-обучающие системы в электросварке*. Киев, НАН Украины.
3. Kobayashi K., Kato H., Shimamoto S. (2004) Modified training system for manual arc welding by using mixed reality and investigation of its effectiveness. *Journal of the Japan society for precision engineering*, 70, 7, 941–945.
4. Heston T. (2008) Virtually welding: a tour of welding simulators that could help the manufacturing word rethink welding training. *Fabricator*, 38, 3, 56–59.
5. Porter N., Cote J., Gifford T., Lam W. (2006) Virtual reality welder training. *Journal of ship production*, 22, 3, 126–138.
6. Hasimoto N., Kato H., Ikehara R. (2006) Training system for manual arc welding by using mixed reality – reduction of position – perception error of electrode tip. *Journal of the Japan society for precision engineering*, 72, 2, 249–253.
7. *Product description Fronius virtual welding* ([www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BFA25696-036863A3/fronius\\_international/hs.xml/79\\_15490\\_ENG\\_HTML.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BFA25696-036863A3/fronius_international/hs.xml/79_15490_ENG_HTML.htm)).
8. (2018) Компания Fronius – новатор внедрения цифровых и коммуникационных технологий. *Автоматическая сварка*, 2, 59–61.
9. Кайтель С., Аренс С., Молл Х. (2014) Использование компьютерных технологий в обучении сварщиков. *Там же*, 1, 54–58.
10. Даниляк С. Н. (1990) Вопросы построения измерительных преобразователей контроля теплосодержания сварочной ванны и скорости сварки для сварочных тренажеров. *Моделирование в тренажерных системах*. Киев, Наукова думка, сс. 111–118.
11. Бигдаш В. Д. (1990) Устройства контроля скорости сварки в тренажерных сварочных системах. *Моделирование в тренажерных системах*. Киев, Наукова думка, сс. 143–150.
12. Патон Б. Е., Коротынский О. Е., Богдановский В. О., Гавва В. М., Махлин Н. М., Буряк В. Ю., Чередник А. Д. (2009) *Спосіб оцінювання параметрів вимірювання швидкості зварювання дугою в дугових тренажерних системах*. Україна, Пат. 86609.
13. Лобанов Л. М., Махлин Н. М., Коротынский А. Е. и др. (2018) Резистометрический способ измерения скорости сварки для тренажерных сварочных систем. *Автоматическая сварка*, 1, 15–21.
14. Васильев В. В., Грездов Г. И., Симак Л. А. и др. (2002) *Моделирование динамических систем. Аспекты монито-*



ринга и обработки сигналов. Васильев В. В. (ред.). Киев, НАН Украины.

15. Симак Л. А. (1984) Метод автоматического определения координат зонда в проводящей среде на основе дифференциальных преобразований. *Электронное моделирование*, **6**, 90–91.

## References

1. Paton, B.E., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2010) Information technologies in education of welders and specialists of welding production: Methodology and technical means. *Svarka i Diagnostika*, **3**, 37-44 [in Russian].
2. Vasiliev, V.V., Simak, L.A., Bogdanovsky, V.A. et al. (2003) *Simulation modeling and training-education systems in electric welding*. Kiev, NASU [in Russian].
3. Koboyashi, K., Kato, H., Shimamoto, S. (2004) Modified training system for manual arc welding by using mixed reality and investigation of its effectiveness. *J. Japan Society for Precision Engineering*, **70**(7), 941-945.
4. Heston, T. (2008) Virtually welding: A tour of welding simulators that could help the manufacturing word rethink welding training. *Fabricator*, **38**(3), 56-59.
5. Porter, N., Cote, J., Gifford, T., Lam, W. (2006) Virtual reality welded training. *J. of Ship Production*, **22**(3), 126-138.
6. Hasimoto, N., Kato, H., Ikehara, R. (2006) Training system for manual arc welding by using mixed reality – reduction of position – perception error of electrode tip. *J. Japan Society for Precision Engineering*, **72**(2), 249-253.
7. *Product description Fronius virtual welding*. www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BFA25696-036863A3/fronius\_international/hs.xml/79\_15490\_ENG\_HTML.htm.
8. (2018) Fronius Company as a pioneer of implementation of digital and communication technologies. *Avtomatch. Svarka*, **2**, 59-61.
9. Keitel, S., Ahrens, C., Moll, H. (2014) Computer-based technologies and their influence on welding education. *Ibid.*, **1**, 51-55.
10. Danilyak, S.N. (1990) Problems of design of measuring transducers for control of heat content of welding pool and speed of welding simulators. *Modeling in simulating systems*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
11. Bigdash, V.D. (1990) Devices of welding rate control in welding simulating systems. *Modeling in simulator systems*. Kiev, Naukova Dumka, 143-150 [in Russian].
12. Paton, B.E., Korotynsky, O.E., Bogdanovsky, V.O. et al. (2009) *Method of evaluation of welding arc movements parameters in arc simulating systems*. Pat. 86609, Ukraine [in Ukrainian].
13. Lobanov, L.M., Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E. et al. (2018) Resistometric method of welding speed measurement for simulating welding systems. *The Paton Welding J.*, **1**, 8-13.
14. Vasiliev, V.V., Grezdov, G.I., Simak, L.A. et al. (2002) Modeling of dynamic systems: *Aspects of monitoring and signal processing*. Ed. by V.V. Vasiliev. Kyiv, NASU [in Russian].
15. Simak, L.A. (1984) Method of automatic determination of probe coordinates in conducting medium on the base of differential transformations. *Elektronnoe Modelirovanie*, **6**, 90-91 [in Russian].

Л. М. Лобанов<sup>1</sup>, Н. М. Махлін<sup>2</sup>, О. С. Коротинський<sup>1</sup>,  
В. С. Водолазький<sup>2</sup>, В. Ю. Буряк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДП «НДЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

## СУЧАСНІ АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ЗВАРЮВАЛЬНИКІВ

В роботі представлені результати розробки технічних засобів напіввіртуального типу для підготовки зварювальників і фахівців зварювального виробництва, виконаних в НДЦ ЗКАЕ спільно з ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та ІПМЕ ім. Г. С. Пухова НАН України. Розглянуто досягнутий до теперішнього часу рівень розвитку технічних засобів навчання та атестації зварювальників і фахівців зварювального виробництва, що дозволяє прогнозувати розширення областей застосування сучасних інформаційних технологій, в тому числі по відтворенню змішаної реальності з максимальною адаптацією віртуального простору до реального зварювального обладнання та забезпечують віддалений доступ телекомунікаційних систем. Показано, що спрощення підготовки та наближення її до умов реальних процесів зварювання можливо застосуванням нового покоління зварювальних тренажерів, в яких широко використовуються сучасні інформаційні технології. Бібліогр. 15, рис. 3.

**Ключові слова:** віртуальна реальність, інформаційні технології, дугові зварювальні тренажери, навчання, зварювальне обладнання, атестація зварювальників

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, N.M. Makhlin<sup>1</sup>, A.E. Korotynsky<sup>1</sup>,  
V.E. Vodolazsky<sup>1</sup>, V.Yu. Buryak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

## MODERN HARDWARE-SOFTWARE COMPLEXES FOR TRAINING OF WELDERS

The article presents the results of development of technical means of semi-virtual type for training welders and welding production specialists at the SE Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy in cooperation with the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine and the G.E. Pukhov IPME of the NAS of Ukraine. The level of development of technical means for training and certification of welders and welding production specialists was considered, which allows predicting the expansion in the fields of application of modern information technologies, including those reproducing the mixed reality with the maximum adaptation of virtual space to real welding equipment and providing the remote access of telecommunication systems. It was shown that simplification of training and its approximation to the conditions of real welding processes is possible using a new generation of welding simulators, in which modern information technologies are widely applied. 15 Ref., 3 Fig.

**Keywords:** virtual reality, information technologies, arc welding simulators, training, welding equipment, certification of welders

Поступила в редакцію 20.03.2018



## В МЕЖДУНАРОДНОМ ИНСТИТУТЕ СВАРКИ (документы, представленные на 70-й ассамблее МИС, Шанхай, 2017)

### Документы комиссии CI — Аддитивное производство, термическая резка и родственные процессы

- I-1345-17** «Производство габаритных инженерных сооружений методами аддитивных технологий» (E. Assunção и др.; Бельгия, Португалия, Великобритания)
- I-1343-17** «Аддитивное производство на основе электронно-лучевого процесса с присадочной проволокой» (B. Baufeld и др.; Великобритания)
- I-1339-17** «Лазерная наплавка порошком и проволокой в коаксиальной компоновке с применением Inconel 718» (F. Silze и др.; Германия)
- I-1338-17** «Численное моделирование сварочной ванны при аддитивном производстве на основе процесса сварки в защитных газах» (Y. Ogino и др.; Япония)
- I-1337-17** «Исследование методов управления дугой при аддитивном производстве методом сварки в защитных газах титановых сплавов» (Jialuo Ding и др.; Великобритания)
- I-1336-17** «Технология производства на основе лазерного процесса (30 кВт) с присадочной проволокой для Международного термоядерного экспериментального реактора» (Y. Goto и др.; Япония)
- I-1335-17** «Рассеивание теплоты при микроплазменной сварке сетчатой проволокой» (J. He и др.; Китай)
- I-1334-17** «Гибридная лазерно-дуговая сварка и сварка с СМТ стыковых соединений деталей из алюминия и стали» (J. Chen и др.; Канада)
- I-1333-17** «Гибридная лазерно-дуговая сварка толстостенных ферромагнитных сталей с электромагнитной поддержкой сварочной ванны» (Ö. Üstündag и др.; Германия)
- I-1332-17** «Исследование лазерно-дуговой гибридной сварки нахлесточных угловых соединений сталей» (T. Kobashi и др.; Япония)
- I-1331-17** «Сравнение и валидация различных термографических методов при сварке сталей» (S-F. Goeske и др.; Германия, Швеция)
- I-1330-17** «Численное моделирование термической эффективности лазерно-плазменной сварки» (S. Jäckel и др.; Германия)
- I-1329-17** «Определение эффективности тепловложения на обратной полярности при дуговой сварке алюминия по модели сварочной ванны» (H-S. Jeong и др.; Южная Корея)
- I-1328-17** «Нестабильность дуги при калориметрии расщепленным анодом при сварке TiG» (S. Egerland; Австрия, Великобритания)
- I-1327-17** «Численное моделирование физических характеристик плазменной дуги в условиях дополнительных ограничений в зазоре» (Bin Xu и др.; Китай, Япония)
- I-1326-17** «Численное моделирование дополнительной электромагнитной силы для управления движениями расплава при высокоскоростной сварке в защитных газах» (Chuansong Wu и др.; Китай)
- I-1325-17** «Двусторонний лазерно-импульсный перенос электродного металла при сварке в защитных газах» (Jia YaZhou и др.; Китай)
- I-1324-17** «Активный акустический датчик для анализа столба дуги» (U. Reisgen и др.; Германия)
- I-1322-17** «Изучение кислородной резки» (Ikegami Yu-ichi и др.; Япония)
- I-1321-17** «(Аннотация) Характеристики микроструктуры и механические свойства сплавов Nb-17Si-23Ti, изготовленных лазерной наплавкой» (W. Liu и др.; Китай)
- I-1320-17** «(Аннотация) Микроструктура и механические свойства покрытий Ti+SiC, нанесенных лазером» (Neng Li и др.; Китай, Великобритания)
- I-1317-17** «Процесс аддитивного производства и типовые дефекты (совместное заседание комиссий I-V)» (Veli Kujaipää; Финляндия)
- I-1316-17** «Итоги вклада конференции IIW ICWAM в аддитивное производство» (D. Chauveau; Франция)
- I-1313-17** «(Аннотация) Сварка каплями пластмассы: сила сцепления между пластиковыми компонентами и армированными термопластами» (E. Moritzer и др.; Германия)
- I-1312-17** «Влияние рассеивания кислорода при лазерно-кислородной резке стали» (Wang Wei и др.; Китай)
- I-1311-17** «Комитет D20 Американского общества сварки по разработке стандарта на аддитивное производство металлических изделий» (D. Kautz и др.; США)
- I-1310-17** «Влияние изменения направления при многопроходной обработке трением с перемешиванием композитов AA6061/B4C» (Vishvesh Badheka и др.; Индия)
- I-1309-17** «Металлургическое исследование лазерного аддитивного ремонта железосодержащих сплавов» (Marga Manuel и др.; США, Франция)
- I-1308-17** «(Аннотация) Понимание формирования металлургических связей при последователь-

ной наплавке полностью расплавленными каплями для расширения области применения плазменного напыления» (Chang-Jiu Li и др.; Китай)

**I-1307-17** «Влияние высокоомощного процесса ультразвукового аддитивного производства на стабильность микроструктуры и кристаллическое строение сплава 3003-H18» (Kittichai Sojiphan и др.; США, Таиланд)

**I-1306-17** «Наплавка в защитных газах с подогревом проволоки сплавов на основе никеля с карбидом титана — влияние условий процесса на микроструктуру» (G. Karsten и др.; Германия)

**I-1305-17** «Аддитивное производство сваркой в защитных газах плавящимся электродом — исследование влияния температуры и времени на гомогенные свойства материала» (P. Henckell и др.; Германия)

**I-1303-17** «3DPMD — дуговое аддитивное производство из титанового порошка» (K. Hoefel и др.; Германия)

**I-1302-17** «Адаптивный процесс управления проволокой и дуговым процессом аддитивного производства при изготовлении элементов сложной формы» (Fang Li и др.; Китай)

**I-1301-17** «Влияние направления наплавки при одностороннем многослойном аддитивном производстве на основе дугового процесса в защитных газах» (Dongqing Yang и др.; Китай)

**I-1300-17** «Аддитивные процессы лазерно-плазменной наплавки порошковых материалов» (V. Korzyk и др.; Украина)

**I-1299-17** «Исследование возможностей процесса СМТ при производстве тонкостенных деталей из сплавов на основе алюминия» (Zhao Yun и др.; Китай)

**I-1298-17** «Плавление проволоки и управление при помощи поверхностного натяжения нагрева проволоки сопротивлением при аддитивном производстве» (Yuan Chengwei и др.; Китай)

**I-1297-17** «Микроструктура и механические свойства микро-, наноструктурных композитных покрытий Ti-6Al-4V, нанесенных лазером» (Wei Li и др.; Китай)

**I-1295-17** «Производство пористых структур средней протяженности на основе процесса плавления лазером» (S. Matthes и др.; Германия)

#### Документы комиссии C2 — Дуговая сварка и присадочные материалы

**II-2056-17** «Определение количества веществ на поверхности проволок для дуговой сварки» (Австрия)

**II-2054-17** «Комментарии по ISO DIS 3690 (Японское общество сварки)» (Япония)

**II-2052-17** «DTR 22281 Присадочные материалы для сварки — позиция IIW» (Австрия)

**II-2051-17** «Матрица присадочных материалов по стандартам ISO — состояние на июнь 2017 г.» (D. Kotecki; США)

**II-2050-17** «Систематический обзор ISO 6847:2008» (D. Fink; Франция)

**II-2049-17** «Систематический обзор ISO 14175:2008» (D. Fink; Франция)

**II-2048-17** «Обновленные стандарты по сварочным материалам — 2017 г.» (D. Fink; Франция)

**II-2043-17** «Влияние содержания железа на металлургические и коррозионные свойства Ni-Cr-Mo сплавов» (MF Gittos и др.; Великобритания)

**II-2042-17** «Исследование швов из сплава ERNiFeCr-1, выполненных TIG сваркой с подогревом проволоки» (Zhiliang Zhou и др.; Швеция)

**II-2041-17** «Влияние включений фазы Лавеса на охрупчивание швов из стали P92 с добавлением Co при длительном старении» (Xue Wang и др.; Китай)

**II-2040-17** «Влияние температуры длительного старения на структуру и механические свойства швов из стали T23 без послесварочной термообработки» (Wang Xue и др.; Китай, Австралия)

**II-2039-17** «Обзор особенностей и текущее понимание разрушения швов из разнородных материалов» (J. Henry и др.; США)

**II-2038-17** «Исследование и улучшение вязкости при средней температуре новых сварочных материалов на основе Ni-Fe для важных электростанций» (Dong Wu и др.; Китай)

**II-2036-17** «Включения в ультрапрочных микролегированных сталях, исследованные методом томографии атомных проб» (P. Haslberger и др.; Австрия)

**II-2034-17** «Микроструктура и свойства сварных соединений из высокопрочных сталей, содержащих 8 % Ni» (R. Cao и др.; Китай)

**II-2028-17** «Гетерогенность структуры и механические свойства металла шва высокопрочных низколегируемых сталей: предложения по корректировке спецификации процедуры сварки» (M. M. Hosseinioun и др.; Иран, Германия, Италия)

**II-2027-17** «Применение стохастического метода конечных элементов при моделировании сварки» (Zheng Li и др.; Германия)

Материал подготовлен Е. П. Четвертко



## ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ КОНКУРС СТУДЕНТСЬКИХ НАУКОВИХ РОБІТ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ «ЗВАРЮВАННЯ»

4 квітня 2018 р. згідно наказу МОН України № 1364 від 10.10. 2017 р. на базі кафедри «Обладнання і технологія зварювального виробництва» Запорізького національного технічного університету відбувся Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт за спеціальністю «Зварювання». Відповідно положення МОН України конкурс складався з двох етапів: першого — заочного рецензування на предмет визначення кращих наукових робіт; другого — наукової конференції, де студенти доповідали про свої роботи, відповідали на запитання і дискутували з опонентами. Наразі опонентами були члени журі конкурсу, а також запрошені викладачі університету. В конкурсі приймали участь студенти зварювального профілю і споріднених зварюванню спеціальностей і спеціалізацій. Всього на конкурс було представлено 62 студентські наукові роботи з 22 вищих навчальних закладів (ВНЗ) України. Представлені роботи, відповідно до їх тематики, рецензувалися провідними вченими зовнішніх ВНЗ. Стосовно рецензії конкурсна комісія визначала рейтинг кожної наукової роботи, а також її рівень, наявність публікації та стан впровадження. На підставі рей-

тингу комісія запросила до участі в конференції студентів-авторів 25 робіт.

Метою конференції було виявлення кращих студентських наукових робіт шляхом їх рецензування та захисту студентами. Саме участь у конкурсах надає студентам змогу набувати досвід публічного захисту своїх наукових результатів, поглиблювати теоретичні знання, опановувати культуру дискусій. Також корисним для студентів стає спілкування зі своїми колегами-однодумцями з інших навчальних закладів. Загалом вирішення таких питань в діловому, дружньому середовищі і стало можливим для студентів на цій конференції.

Конференцію відкрив вступною доповіддю ректор ЗНТУ доктор технічних наук, професор Беліков Сергій Борисович. Він тепло привітав учасників конференції з початком роботи, підкреслив важливість заходу і побажав успіхів кожному з її учасників. Потім з коротким оглядом наукових розробок і їх практичної реалізації виступив проректор з наукової роботи та міжнародної діяльності, професор, доктор технічних наук Наумик Валерій Володимирович. Він також побажав успіхів кожному з учасників конференції. Далі з питаннями по організації конференції



Учасники конкурсу

виступив голова конкурсної комісії, завідувач кафедри «Обладнання і технології зварювального виробництва» доктор технічних наук, професор Овчинников Олександр Володимирович.

Конференція складалася із двох секцій: «Технології та устаткування зварювання» і «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій». На секціях, відповідно профілю наукових досліджень, заслуховувалися у вигляді презентації, доповіді студентів. Доповідачам задавали питання, часом виникали наукові дискусії теоретичного та практичного характеру. Важливим було те, що студентам об'єктивно надавалась можливість відчувати свої «слабкі» місця, яких потрібно позбутися в недалекому майбутньому.

Здебільшого доповіді студентів відповідали науковій тематиці, що виконується на кафедрах зварювального профілю. Для участі у виконанні таких тем і залучалися студенти, про це засвідчували їх публікації, патенти та доповіді на конференціях. Всього на підсумковій науково-практичній конференції виступили з доповідями 20 студентів із 17 ВНЗ України. На підставі рецензії та оцінки доповідей галузева конкурсна комісія вирішила визнати переможцями конкурсу і нагородити дипломами наступних студентів. Дипломи I-го ступеня отримали: Наталенко В. В. (Донбаська державна машинобудівна академія); Охріменко В. О. (Сумський державний університет); Тонкушіна К.Д. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»). Дипломи II сту-

пеня отримали: Строгонов Д. В. (Запорізький національний технічний університет); Вінников Є. М. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет); Туренко М. І. (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); Занько Б. Г. (Львівський національний аграрний університет); Осадчук А. А. (Вінницький національний технічний університет). Дипломи III-го ступеня отримали: Єсаулова Ю. Р. (Національна металургійна академія України); Ткаченко Д.Г. (Дніпровський державний технічний університет); Шолудько А. І. (ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»); Буріков С. В. (ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»); Новіков І. С. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»); Дурман С. М. (Таврійський державний агротехнологічний університет); Доненко В. А. (Чернігівський національний технологічний університет); Болгарин Д. В. (Миколаївський національний аграрний університет); Юдін В. С. (Херсонський державний університет); Балдук А. М. (Миколаївський національний аграрний університет).

Загалом рівень теоретичної та практичної підготовки студентів, учасників конференції був високим, а сама конференція була належним чином організована. Учасники і організатори конференції відмітили її актуальність, а також важливу роль конференції у справі підготовки спеціалістів-зварювальників, а також спеціалістів споріднених зварюванню.

В.В. Дмитрик

## Электроды ПАТОН™ сертифицированы для продажи в Европе

Опытным заводом ИЭС им. Е.О. Патона успешно завершён процесс сертификации сварочных электродов ПАТОН™ для рынка Европы.

Наличие сертификата CE юридически подтверждает тот факт, что качество, рабочие характеристики, экологичность и безопасность электродов ПАТОН™ соответствуют всем необходимым требованиям со стороны европейского рынка и предоставляет возможность Заводу беспрепятственно поставлять данную продукцию в 25 стран Единой Экономической Зоны, а также в страны, признающие европейскую сертификацию.

Получение сертификата CE — ещё один важный этап реализации стратегии ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона по развитию бренда и расширению поставок высококачественных сварочных материалов отечественного производства на зарубежные рынки.



## ПАМЯТИ В. Г. ФАРТУШНОГО



Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона, специалисты Общества сварщиков Украины с глубоким прискорбием извещают о кончине известного специалиста в области сварки, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника, президента Общества сварщиков

Украины Владимира Григорьевича Фартушного.

С 1960 г. молодой выпускник Киевского политехнического института Владимир Фартушный был направлен на работу в Институт электросварки им. Е. О. Патона, где прошел путь от инженера до заведующего лабораторией сварки высоколегированных коррозионностойких сталей и сплавов. Успешное исследование особенностей сварки хромоникельмарганцевых сталей, разработка технологии их сварки позволили В. Г. Фартушному уже в 1966 г. защитить кандидатскую диссертацию.

За 20-летний период работы в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ В. Г. Фартушный внес весомый вклад в создание и развитие научных основ сварки высоколегированных коррозионностойких сталей, разработку новых технологий и сварочных материалов применительно к актуальным задачам химического машиностроения.

При его непосредственном участии, а также под его руководством выполнены комплексные исследования по разработке технологии сварки новых марок аустенитных сталей с пониженным содержанием никеля, по исследованию свариваемости и разработке технологии сварки двухслойных сталей, по созданию высококремнистой аустенитной стали, предназначенной для изготовления оборудования, работающего в условиях воздействия крепкой азотной кислоты при высоких температурах.

В 1965–1971 гг. В. Г. Фартушный принимал активное участие в проведении исследований по подготовке экспериментов по сварке в космосе: участвовал в разработке и испытании установки «Вулкан», на которой в 1969 г. впервые в мире осуществлена сварка в космическом пространстве; с мая 1968 г. проходил подготовку в ЦПК в качестве бортинженера космического корабля «Союз».

В 1980 г. по инициативе Б. Е. Патона В. Г. Фартушный возглавил Всесоюзный проектно-конструкторский институт сварочного производства (ВИСП, а с 1992 г. — УкрИСП), где проработал до 2004 г. Здесь особо ярко раскрылись организаторские способности В. Г. Фартушного.

Под его руководством и при непосредственном участии выполнен огромный объем работ по созданию средств комплексной механизации и автоматизации сварочного производства, в том числе серийного механического сварочного оборудования, комплексного оборудования для нанесения газотермических покрытий, робототехнических комплексов, которые успешно внедрены на заводах Украины и России.

В 1999 г. В. Г. Фартушный был избран академиком Украинской академии наук. Он автор более 100 научных работ и изобретений.

В 1995 г. его избрали президентом Общества сварщиков Украины и на этом посту много сил и энергии он отдавал совершенствованию деятельности общества.

Свойственные В. Г. Фартушному высокий профессионализм и трудолюбие, порядочность и доброжелательность снискали ему авторитет, уважение коллег и друзей.

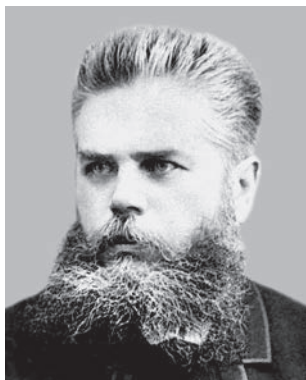
Светлая память о Владимире Григорьевиче навсегда останется среди его друзей и коллег по совместной работе. Выражаем глубокое соболезнование его родным и близким.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
Общество сварщиков Украины,  
редколлегия журнала

Подписано к печати 24.04.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24.  
Печать ООО «ДИА».  
03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.



## **К 175-летию Н.Н. БЕНАРДОСА — ИЗОБРЕТАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ**



Жизненный путь Н. Н. Бенардоса начался в селе Мостовое Херсонской губернии (ныне Николаевская обл.), носившем название Бенардосовка, по фамилии деда изобретателя — генерала Пантелеймона Бенардоса.

В мастерских, где в молодые годы работал Бенардос, не было больших нагревательных печей. Поэтому изобретатель попробовал греть кромки металла вольтовой дугой перед их проковкой, при этом металл частично оплавлялся и соединялся небольшими участками.

Создавая электрическую цепь между двумя электродами, мастера достигали появления дуги, которой и прогревали необходимое изделие. Бенардос во время своих опытов однажды догадался превратить само изделие в один из электродов, включив его в замкнутую электрическую цепь. В результате дуга самостоятельно начала проплавливать поверхность детали и ученый, таким образом, совершил свое самое знаменитое открытие — способ электросварки. Своему изобретению Н. Н. Бенардос дал название «электрогефест», произведя его от имени Гефеста — бога огня, покровителя кузнечного ремесла.

Первые швы с помощью угольного электрода были сварены Бенардосом в Париже в 1881 г. и представлены на Парижской международной электрической выставке, на которой «электрогефест» был признан главным экспонатом и получил золотую медаль.

После тщательнейшей проработки и доведения своего способа до возможности промышленного применения 31 декабря 1886 г. Департаментом торговли и мануфактур Царской России Н.Н. Бенардосу была выдана десятилетняя Привилегия №11982.

Метод, созданный Бенардосом, был весьма прост. В описании к Привилегии сущность его излагалась так: «Предмет изобретения составляет способ соединения и разъединения металлов действием электрического тока... основанный на непосредственном образовании вольтовой дуги между местом обработки металла, составляющим один электрод, и подводимой к этому месту рукояткою, содержащею другой электрод, и соединенной с соответственным полюсом электрического тока».

С помощью этого способа могут быть выполнены следующие работы: соединение частей между собой, разъединение или разрезывание металлов на части, сверление и производство отверстий и полостей и наплавление слоями».

В 1885 г. в Петербурге была организована первая в мире сварочная фирма — Товарищество «Электрогефест» по эксплуатации и внедрению изобретения Бенардоса. Она быстро приобрела мировую известность. Промышленники многих стран, производивших паровозы, котлы, металлоконструкции и другие изделия, приезжали в Петербург для ознакомления с новым технологическим процессом. На глазах специально прибывшего знаменитого немецкого профессора Р. Рюльмана, Бенардос в течение 1 часа произвел ремонт заводского котла, чинить который собирались три недели.

К середине 1890-х гг. новый технологический процесс внедряется более чем на 100 заводах Западной Европы и США. Например, французские паровозы Шнайдера имели слабые рамы, которые не поддавались традиционным методам обработки. Лишь применение электросварки Н. Н. Бенардоса смогло решить задачу и позволить составам проехать рекордные 174000 верст без следов каких-либо повреждений. Тем не менее, появились и оппоненты, указывающие, например, на яркий и пагубный для глаз и кожи свет электрической дуги.

Вследствие этого общество «Электрогефест» сразу начало применять различные средства защиты от излучения. Стоит отметить, что модель костюма сварщика Шатур-



Золотая медаль Всероссийской электрической выставки

Николай Николаевич Бенардос был удостоен высшей награды Императорского Русского Технического общества — золотой медали, а в мае 1893 г. избран действительным его членом.

Особое внимание Н. Н. Бенардос уделял повышению качества сварных соединений. С этой целью он применил защитные газы. Улучшения качества швов он достигал также путем прокатки оплавленных кромок роликами. Изобретатель предложил и испытал множество электродов. Сохранились его чертежи полых электродов, заполненных шихтой из смеси металлических порошков и флюсов, оригинальные конструкции дисковых и спиральных электродов, а сварка угольным электродом получила название «Способ Бенардоса».

Он разработал способы дуговой резки, подводной сварки и резки, сварки на вертикальной поверхности. Изобретатель высказал идею сварки в газовой струе и под флюсом.



Бюст Н.Н. Бенардоса, автор Г.Г. Дочкин

ской швейной мануфактуры называлась «Бенардос».

Н.Н. Бенардос непрерывно работал над совершенствованием «электрогефеста». На проходившей в январе 1892 г. в Санкт-Петербурге IV Всероссийской электрической выставке демонстрировалось более 30 различных изобретений Бенардоса, оформленных в отдельную экспозицию. Н. Н. Бенардосу была вручена высшая награда выставки — золотая медаль.

1 мая того же года «За удачное применение вольтовой дуги к спаиванию металлов и наплавлению одного металла на другой» Николай Николаевич Бенардос был удостоен высшей награды Императорского Русского Технического общества — золотой медали, а в мае 1893 г. избран действительным его членом. Особое внимание Н. Н. Бенардос уделял повышению качества сварных соединений. С этой целью он применил защитные газы. Улучшения качества швов он достигал также путем прокатки оплавленных кромок роликами. Изобретатель предложил и испытал множество электродов. Сохранились его чертежи полых электродов, заполненных шихтой из смеси металлических порошков и флюсов, оригинальные конструкции дисковых и спиральных электродов, а сварка угольным электродом получила название «Способ Бенардоса». Он разработал способы дуговой резки, подводной сварки и резки, сварки на вертикальной поверхности. Изобретатель высказал идею сварки в газовой струе и под флюсом. Он изобрел оригинальные методы точечной и шовной контактной электро-сварки. Список его открытий включает 196 изобретений. Он получил патенты во Франции, Бельгии, Великобритании, Австро-Венгрии, Швеции, Италии, Германии, США, Норвегии, Дании, Испании, Швейцарии, Царской России.

Бенардос создал много конструкций сварочных автоматов, им были предложены и реализованы идеи механизации процесса сварки путем вращения изделий. Его установки электродуговой сварки поражали своим ресурсом. Одна из них проработала на заводе Гужона свыше 30 лет, и была разобрана лишь в 1931 г.

Последние годы жизни Н. Н. Бенардоса оказались весьма тяжелыми. В 1898 г. Бенардос переезжает в г. Фастов Киевской губернии: жить в Петербурге ему было уже совершенно не по карману. И все-таки на последние деньги он патентует способ приготовления губчатого свинца для аккумуляторных пластин, а в 1899 г. получает привилегию на способ изготовления борон методом штамповки из листа. В 1899 г. Электротехнический институт в



Петербурге присвоил ему звание почетного инженера-электрика, поставив его изобретение в один ряд с таким выдающимся изобретением, как радио А. С. Попова.

Несмотря на всеобщее признание, он по-прежнему оставался бедным. После долгих лет колебаний Бенардос решает просить совет Русского тенического общества о назначении ему пожизненной пенсии. Через три года, 21 сентября 1905 г. Бенардос скончался. На его смерть не отозвался ни один журнал.

Но созданная Н. Н. Бенардосом электросварка, пожалуй, является лучшим памятником ее изобретателю. Гениальное изобретение Н. Н. Бенардоса нашло неожиданное применение и в искусстве. Примером тому может служить скульптурный бюст изобретателя, созданный талантливым украинским сварщиком Григорием Григорьевичем Дочкиным. Он изготовлен с использованием аргодуговой сварки титана без последующей мехобработки.

Увлечение Г. Г. Дочкина художественной сваркой началось с того времени, когда еще молодому специалисту пришлось варить отдельные детали из титана для космического «Лунохода». Подбирая разные режимы сварки, он заметил такое свойство материала, как смена цвета в зависимости от температуры и продолжительности нагрева. Эти особенности поразили Григория, и с того момента маленькие кусочки металла в руках Дочкина начали превращаться в разнообразные скульптурные произведения в виде миниатюрных насекомых, животных, цветов. Придавая этим композициям различную окраску и утонченность форм, специалист с высоким уровнем мастерства смог превратить личное увлечение в профессиональное занятие, разработав собственную технику художественной сварки. Среди работ Дочкина — кольцо-постамент из титана с надписями «USA» и «СССР». На нем расположена женская рука, с которой взлетал голубь мира. Эта работа была подарена американскому президенту Ричарду Никсону во время посещения им Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

Сотни миллионов тонн металлических конструкций — от стоек и балок до атомных реакторов и космических кораблей — изготавливаются в наше время с помощью различных способов дуговой сварки. Лучшие достижения современной науки поставлены на службу сварочной технике. Ее создают и развивают новые поколения ученых и изобретателей, в благодарной памяти которых навсегда сохранится имя изобретателя дуговой сварки Николая Николаевича Бенардоса.

Огромное количество изобретений и новейших технологий создали современный мир, ускорили его развитие и позволили бурно развиваться науке и технике многих стран. Изобретатели нередко становятся популярными. Такие имена, как Никола Тесла и Томас Эдисон, Дмитрий Менделеев и Игорь Сикорский знакомы каждому школьнику в любой цивилизованной стране. Однако возможна и другая ситуация, когда изобретением гения пользуется весь мир, но имя его малоизвестно не только при жизни, но и незаслуженно отодвигается на второй план в истории. К тому же, некоторые изобретения стали настолько обыденными, что люди перестали попросту обращать на них внимание, но значение их от этого не стало менее важным.



Академик Б. Е. Патон вручает работу Г. Г. Дочкина «Голубь мира» Ричарду Никсону (ИЭС, 1994 г.)

Материал подготовлен компанией «Стил Ворк»



## **Электронно-лучевая технология: современное состояние и перспективы**

Технология электронно-лучевого испарения (атомизации) и последующего физического осаждения паровой фазы в вакууме (ЕВ-PVD) для получения толстых пленок и массивных конденсатов с заданными структурой и свойствами начала разрабатываться в Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством проф. Б. А. Мовчана в начале 1960-х годов. Созданные в период 1975-1991 гг. в ИЭС им. Е. О. Патона электронно-лучевые технологии и оборудование (15 промышленных многокамерных установок) были внедрены на многих предприятиях министерств авиационной, судостроительной и газовой промышленности для нанесения жаростойких, коррозионностойких и термобарьерных покрытий с внешним керамическим слоем на лопатки газовых турбин различного назначения.

Государственное хозрасчетное предприятие «Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины» (МЦ ЭЛТ) существует с 1994 г. и продолжает систематические научные исследования и разработки новых материалов и защитных покрытий, получаемых с использованием электронно-лучевых технологий. Разработаны научные основы электронно-лучевых технологий получения аморфных, нанокристаллических, дисперсно-упрочненных, микрослойных, пористых и градиентных материалов и покрытий; конкретные технологии и новые образцы электронно-лучевого оборудования, получившие международное признание, защищены многочисленными патентами (США, Европы, России, КНР), в том числе совместными патентами с заказчиками.

Разработанные в МЦ ЭЛТ технологии для нанесения градиентных защитных покрытий обеспечивают более высокую степень повторяемости состава, структуры и долговечности по сравнению с покрытиями, получаемыми по традиционной технологии. Например, градиент-





Электронно-лучевые установки последнего поколения, разработанные и изготовленные в МЦ ЭЛТ, эксплуатируются в США, Канаде, КНР и Индии

ные термобарьерные покрытия типа  $\text{NiAlDy/YSZ}$ ,  $\text{NiCoCrAlY/AlCr/YSZ}$  с толщиной керамического слоя около 150 мкм имеют низкий уровень теплопроводности (примерно 1,2 Вт/(м·К), а их термоциклическая долговечность в 2–3 раза выше, чем у традиционных термобарьерных покрытий.

Разработан вариант многослойного демпфирующего и эрозионностойкого градиентного наноструктурного покрытия для защиты лопаток из титановых сплавов.

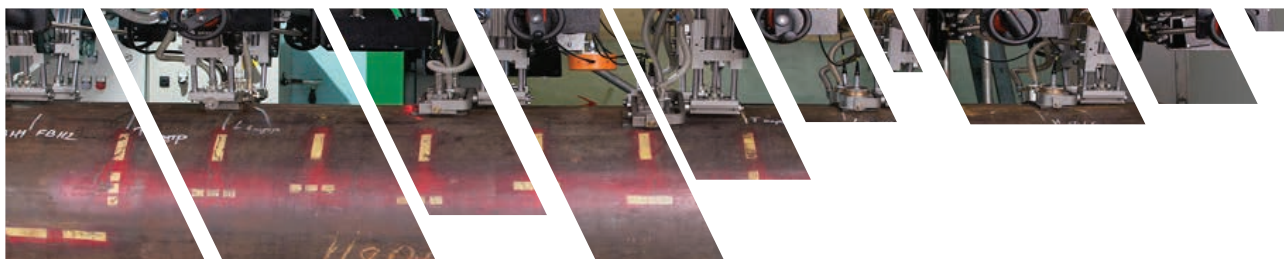
Основными заказчиками МЦ ЭЛТ на выполнение научно-исследовательских контрактов являются зарубежные компании и научные центры США («Дженерал Электрик», «Пратт и Уитни», «Хромаллой», Пенсильванский университет), Канады, Японии, Индии.

В настоящее время 16 сконструированных и изготовленных в МЦ ЭЛТ электронно-лучевых установок успешно эксплуатируется в США, Канаде, Китае и Индии, при этом всем заказчикам предлагается как оборудование, так и новые технологии. За последние годы вместе с электронно-лучевыми установками продано 4 лицензии на право промышленного использования патентов для осаждения градиентных термобарьерных покрытий, прошли обучение инженеры и техники заказчиков.

В МЦ ЭЛТ ведутся разработки вариантов гибридных электронно-лучевых технологий, объединяющих физические и химические процессы осаждения неорганических веществ в вакууме. Электронно-лучевая гибридная нанотехнология и соответствующее оборудование является реальной основой для дальнейшего научно-технического и экономического прогресса для получения защитных покрытий в различных областях современного машиностроения.

В последнее время одновременно с отмеченными выше традиционными технологическими направлениями в МЦ ЭЛТ получило развитие новое направление: электронно-лучевая технология простых и композиционных нанопорошков и наножидкостей (коллоидов), а также наноструктурных композиций растительных экстрактов с наночастицами металлов для медицины и сельского хозяйства.

Б.А. Мовчан, К.Ю. Яковчук  
Государственное предприятие  
«Международный центр электронно-лучевых технологий  
Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины»



Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



XXII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

# СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

## 10–14 вересня 2018

Одеса, Аркадія, готель «Курортний»

Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України

Генеральний спонсор  
ПрАТ «УкрНДІНК»



**ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ**  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
тел. (+38044) 200-82-77, 205-22-49  
journal@paton.kiev.ua  
posypaiko.yurii@gmail.com

<http://pwi-scientists.com/rus/nktd2018>



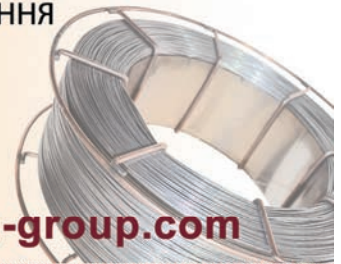


## МИ СТВОРЮЄМО ТЕ, ЩО З'ЄДНУЄ ТА ОБ'ЄДНУЄ

НАЙБІЛЬШИЙ ВИРОБНИК  
ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ  
В УКРАЇНІ

БІЛЬШЕ НІЖ 75 МАРОК ДІАМЕТРОМ 0,9-6 мм  
ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ,  
НАПИЛЕННЯ

[www.weldtech-group.com](http://www.weldtech-group.com)



## ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный»  
10 – 14 сентября 2018 г.



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

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и вместе с тезисами доклада направить ее в Оргкомитет до 20 июня 2018 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

### Оргкомитет

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,  
ул. Казимира Малевича 11,  
г. Киев, 03680, Украина;  
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

### Контрольные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов	до 20.06.2018 г.
Рассылка второго информационного сообщения и подтверждение участия	до 12.07.2018 г.
Оплата регистрационного взноса	до 11.09.2018 г.



## Опыт сотрудничества компаний «RFA Robotics» и «Зерновой дом» в рамках концепции «Индустрия 4.0»

Компания «Зерновой дом» — украинский завод по производству элеваторов и элеваторного оборудования, главным партнером которого является американская компания «Sukup», занимающая ведущие позиции на международном рынке. Деятельность компании направлена на предоставление услуг широкого спектра по изготовлению и возведению элеваторных сооружений, а также их комплексного обслуживания.

Наверное, многие читатели журнала при поездке по Украине замечали огромные металлические цилиндрические сооружения, стоящие вдоль трасс, в ночном лунном свете они напоминают космические корабли. Это бункеры для охлаждения и хранения зерна, проездные эстакады, которые производит «Зерновой дом».

«Зерновой дом» — современный, высокотехнологичный завод с гибким мобильным производством и четкой позицией противопоставления активной деятельности инертному выжиданию, характерным для украинского производителя старого образца. Это как свобода и обреченность, где стремление «быть» говорит о том, что люди, работающие на таком предприятии, осознанно сделали выбор в пользу активной позиции развития.

Любой процесс в обществе нужно рассматривать как маркер общих тенденций развития страны, и сущность любого производства расскажет больше, чем выступления руководителей различного уровня о культурных, экономических, политических сдвигах в целом. Но мы будем говорить о конкретных внедрениях: в середине апреля 2018 г. запорожская компания «Триада-Сварка» завершила проект по роботизации одного из производственных узлов на белоцерковском заводе «Зерновой дом». Читателям полезно узнать об этом уникальном проекте и опыте сотрудничества двух компаний, устремленных в будущее.

Компания «Триада-Сварка» — современная инженеринговая компания, имеющая в спектре своей деятельности направление по роботизации сварочных процессов. RFA Robotics — подразделение роботизации компании, официальный сертифицированный представитель в Украине одного из ведущих в мире производителей роботов Yaskawa Motoman (Япония). RFA Robotics специализируется в проектировании и разработке технологий для роботизации сварочных процессов, в том числе контактной сварки, наплавки, перемещения изделий. Проект по роботизации процесса сварки уникального изделия включал следующие этапы:

- ♦ изучение и анализ свариваемого изделия;
- ♦ изучение и отработка необходимой технологии сварки;
- ♦ проектирование и комплектация роботизированного сварочного комплекса (РТК) с учетом имеющихся производственных мощностей и специфики производственного процесса, интеграции комплекса в производство в целом;
- ♦ подбор сварочного оборудования и материалов;
- ♦ проектирование и изготовление необходимых кондукторов, позиционеров;





- ♦ проектирование и изготовление защитных сварочных ограждений, а также системы очистки сварочной горелки Binzel BRS-CC;
- ♦ подбор и установку системы безопасности при работе РТК;
- ♦ обучение специалистов предприятия управлению и программированию робота;
- ♦ монтаж и установку РТК, отработку режимов, запуск «под ключ»;
- ♦ дальнейшее сопровождение и гарантийное обеспечение работы РТК.

Роботизированный комплекс для дуговой сварки был укомплектован и поставлен исходя из задач и решений для данного предприятия с учетом перспективы развития завода в будущем. Предложенный промышленный робот Motoman MA 1440 специально разработан для решения высокотехнологических сварочных задач с работой на высоких скоростях для снижения времени цикла обработки изделия. Эргономичный дизайн позволяет размещать робота в напольном, настенном и потолочном положении в условиях дефицита пространства.

РТК укомплектован промышленным позиционером VMS 500SD, на котором установлен сервомотор компании Yaskawa Motoman, следовательно, сварочный робот и позиционер полностью синхронизированы и имеют точность позиционирования

0,08 мм. К тому же, использован позиционер с вертикальной осью вращения и высокими заводскими характеристиками, который специально предназначен для столов со сменными позициями.

Энергосберегающий контроллер нового поколения DX200, используя запатентованную технологию совместного управления роботами, свободно может выполнять многоцелевые задачи, включая совместное управление 8 роботами (до 72 осей в перспективе), также устройствами ввода-вывода и протоколами передачи данных.

Робот оснащен сварочным аппаратом Fronius TPS 320i, который взаимодействует с пользователем на интеллектуальном уровне; устройством подачи проволоки Fronius WF 25i R, обеспечивающем стабильную подачу проволоки; системой очистки горелки Binzel BRS-CC (данная система — комплексное решение для автоматического обслуживания сопел горелок с наивысшим уровнем надежности работы). Вся роботопериферия производства Abicor Binzel.

Компания «Триада-Сварка» — единственный сертифицированный в Украине официальный представитель мировых производителей сварочного оборудования Fronius (Австрия), роботопериферии Abicor Binzel (Германия), а также одного из лучших в мире производителей сварочных материалов Askaynak (Турция). Триада-Сварка имеет собственные технологический и сервисный центры, на базе которых и прошли обучение работе и управлению роботом представители «Зернового дома».

Директор компании «Зерновой дом» Габриадзе В.З. высоко оценил подобный опыт сотрудничества, обеспечивающий единство целей и ценностей, которые имеют огромное значение для построения будущего. Поэтому поиск новых путей использования технологий для изменения существующих систем производства является активной позицией компании «Зерновой дом» и открывает возможности развития как завода, так и в целом концепции «Индустрия 4.0» в Украине.

Е. Красносельская



Украина, г. Запорожье  
+38(061) 220-00-79, 233-10-58  
www: rfa-robotics.com





# **Институт титана**

## ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИНСТИТУТ ТИТАНА»

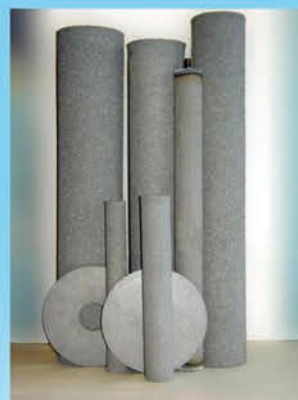
специализируется в области разработки техники, технологии и проектировании предприятий для производства цветных и редких металлов, решает вопросы расширения, реконструкции и модернизации объектов производственного назначения.

### Институт титана выполняет:

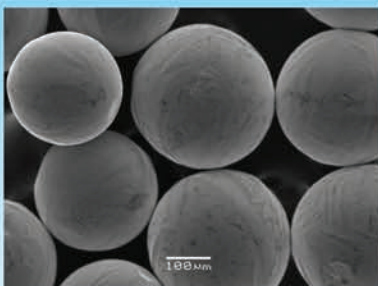
- научные исследования
- технологические разработки
- опробование сырья
- проектно-конструкторские разработки

### оказывает техническую помощь при строительстве, монтаже и освоении технологий производства по следующим направлениям:

- титановые шлаки для получения титана губчатого и пигментного диоксида титана
- тетрагидрид титана и его очистка
- титан губчатый
- порошки титана, изделия из титановых порошков
- редкие металлы – цирконий, ванадий, скандий, галлий
- полупроводниковые материалы
- тяжелые металлы – цинк, свинец, никель
- десульфурация чугуна гранулированным магнием
- нержавеющая сталь (метод газокислородного рафинирования (ГКР))
- защита окружающей среды, разработка нормативной документации
- стандартизация, сертификация, метрология, аналитический контроль, стандартные образцы, аккредитация аналитических лабораторий



Порошки сферические и порошки, полученные по технологии гидрирования-дегидрирования титана губчатого и титаносодержащих материалов необходимого гранулометрического состава (40-100 мкм) для аддитивных технологий, синтеза изделий методами порошковой металлургии, наплавки, напыления



Пористые спеченные изделия для очистки различных агрессивных сред, а также для фильтрации питьевой и минеральной воды

**Институт сертифицирован  
по международному стандарту ISO 9001:2015**

**ПАО «Институт Титана»**

Проспект Соборный, 180, г. Запорожье, Украина, 69035

Тел.: +38 (061) 289-91-00; факс: +38 (061) 289-91-30

E-mail: [common@timag.org](mailto:common@timag.org)

<http://www.timag.org>

## Новый сварочный процесс ArcTig компании Fronius\*

*При сварке имеет значение не только качество шва, но и скорость его выполнения. Обе эти характеристики позволяют повысить эффективность работы сварщика и снизить издержки. Для их улучшения и был разработан инновационный модифицированный процесс TIG компании Fronius для механизированной соединительной сварки — ArcTig. Специальная сварочная горелка позволяет фокусировать дугу TIG в нужном месте, значительно повышая плотность энергии. Сварщики могут сваривать листы высоколегированной стали и трубы толщиной до 10 мм значительно быстрее и с соблюдением самых высоких стандартов качества. При этом не требуется тщательная подготовка шва.*

Сварочный процесс ArcTig основан на принципе сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (tungsten inert gas welding — сокращенно TIG). В процессе TIG сварочная дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и металлической деталью в бескислородной среде химически нейтрального газа. Электрический ток нагревает электрод, создавая поток электронов. Это снижает общее сопротивление и обеспечивает «мягкую» и широкую дугу. Защитный инертный газ предотвращает химические реакции в жидкой сварочной ванне. Данный процесс обеспечивает идеальный внешний вид сварного шва без цветов побежалости и брызг, а также оптимальную волнистую форму. Сварка TIG может использоваться в различных отраслях для сварки разных металлов, даже таких сложных, как титан.

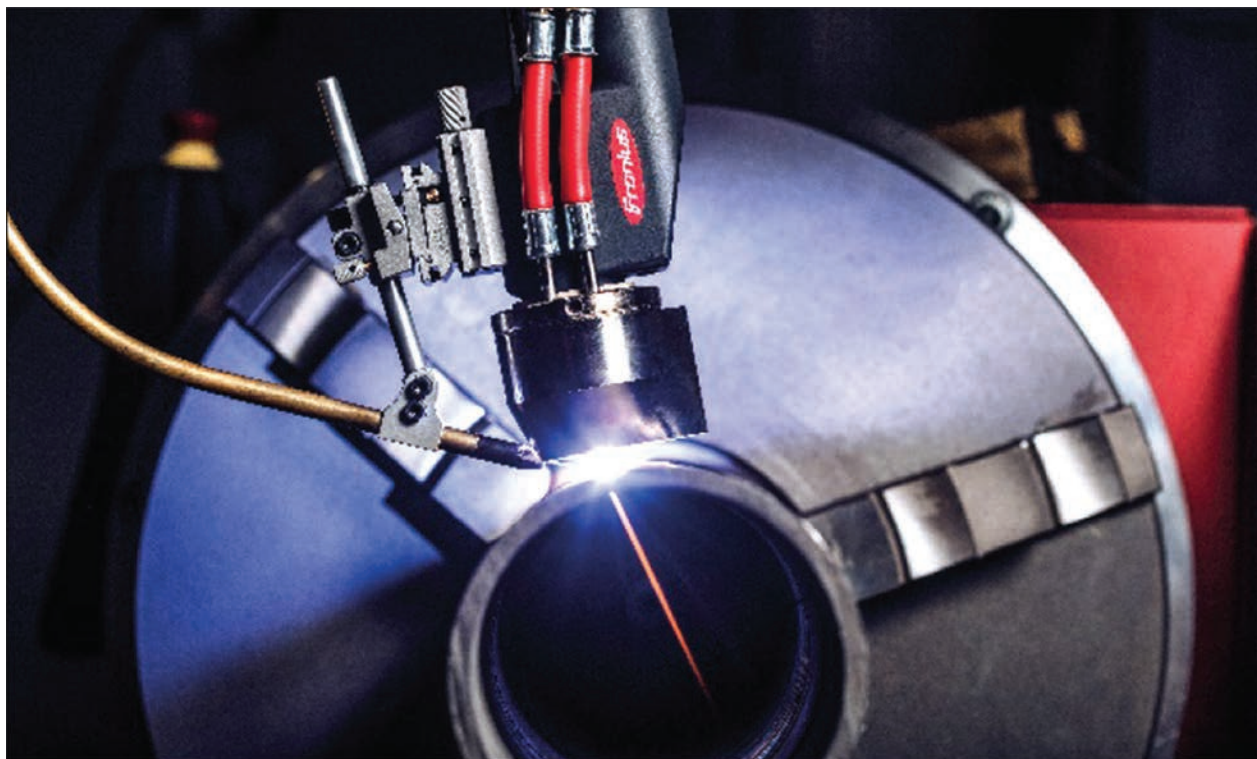


Сварочный процесс ArcTig компании Fronius обеспечивает высокую скорость сварки и максимальное качество сварного шва

Новый сварочный процесс ArcTig с успехом применяется при строительстве контейнеров и трубопроводов, при изготовлении турбин и специального оборудования, кранов и резервуаров. Ключевая инновация в этом процессе — оптимизированная конструкция сварочной горелки с зажимной системой для электрода, которая обеспечивает охлаждение электрода по всей длине. Это повышает общее сопротивление, а значит и напряжение дуги. Поток электронов возникает в узкой области и имеет очень высокую плотность. Более узкая и сфокусированная дуга обеспечивает высочайшее качество сварных швов. Еще одно преимущество такой системы охлаждения заключается в том, что она предотвращает перегрев электрода во время сварки, увеличивая стабильность дуги, срок службы электрода и характеристики поджига. Заказчики могут легко модернизировать все существующие источники питания TIG, рассчитанные на ток свыше 220 А, для поддержки процесса ArcTig. Единственное дополнительное оборудование, которое при этом требуется, — это новая сварочная горелка и дополнительный теплообменник, который обеспечивает необходимую охлаждающую способность и стабильность температуры. Процесс ArcTig также доступен в полной системе. Благодаря инновационному процессу ArcTig Fronius удалось сократить длительность технологических операций и расходов на присадочный материал. Сфокусированная сварочная дуга с высоким давлением

\* Статья на правах рекламы.





Конструкция сварочной горелки с зажимной системой для электрода, обеспечивающая охлаждение электрода по всей длине

дает возможность использовать процесс ArcTig для однослойной сварки деталей из листового металла толщиной до 10 мм. При традиционной сварке TIG часто изделия приходится сваривать в несколько слоев. Кроме того, новый сварочный процесс не требует длительной подготовки деталей к сварке. Отсутствие зазоров при подготовке шва означает, что в процессе ArcTig не требуется поддерживать сварочную ванну. Сниженное тепловое воздействие означает минимальную высоту сварного шва и минимум деформаций, что уменьшает объем последующих доработок. Заказчики получают возможность значительно сократить длительность производственных операций, поскольку этот сварочный процесс также обеспечивает более высокую скорость. Кроме того, за счет уменьшения объема сварного шва сокращаются затраты на материалы.

Выполнять сварку методом ArcTig очень просто. Он не столь кардинально отличается от стандартного метода TIG, поэтому не требует переналадки процессов и переобучения сварщиков. Заказчики могут практически сразу начать работу по новому методу, не опасаясь ошибок на начальном этапе. Для использования процесса ArcTig нужно настроить всего несколько параметров. Заказчики могут использовать стандартные электроды для сварки TIG, которые при необходимости можно быстро заменить или зачистить. В новой зажимной системе для электродов область захвата больше. Это упрощает доступ к сварному шву и позволяет лучше контролировать дугу.

*Fronius International — австрийское предприятие с главным офисом в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Замтледте. Предприятие специализируется на системах для зарядки батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3817 сотрудников. Доля экспорта составляет 89 %, что достигается благодаря 28 дочерним компаниям, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 1242 действующим патентам, Fronius является лидером в этой области технологий на мировом рынке.*



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



## Календарь мая

### 1 мая 1893

Открытие Всемирной выставки в Чикаго, на которой Николай Григорьевич Славянов получил Золотую медаль за способ электросварки под слоем толченого стекла. Кроме этого, посетители увидели удивительный предмет — двенадцатигранный стакан высотой 21 см из стального литья. Электрическая дуга была использована для ликвидации в нем литейных изъянов, считавшихся у металлургов естественными. В 1895 г. с использованием метода Славянова на заводе были отлиты слитки из тигельной и мартеновской стали весом 100...800 пудов (1600...12800 кг). В Перми Славянов стал использовать собственный новейший метод для корректировки недостатков литья, ремонтных работ с деталями паровозов, паровых машин, зубчатых колес, артиллерийских орудий.



### 2 мая 1969

В первый рейс Саутгемптон–Нью-Йорк отправился океанский лайнер «Queen Elizabeth 2», бывший на протяжении 35 лет флагманом британского парохозяйства «Cunard». Цельносварная конструкция корпуса корабля была разделена на 13 водонепроницаемых поперечных переборок. Наружная палуба, обшитая деревом, крепилась на приваренных шпильках. Что касается алюминиевых палуб, то из-за применения тонкого материала на корабле возникал «пружинающийся» эффект при ходьбе. Это было преодолено, в значительной степени, с помощью приварки ребер жесткости крест-накрест на более крупных участках палубы.



### 3 мая 1973

За день до окончания строительства 108-этажного здания Сирс-Тауэр — небоскреба, находящегося в г. Чикаго, США, оно становится самым высоким зданием в мире на то время (442,1 м). Является визитной карточкой Чикаго. Возведение такой конструкции здания — это серьезная работа для строительных и сварочных компаний. При строительстве было использовано около 76000 т стали. Компания «Lincoln Electric» участвовала в проекте в качестве партнера строительства. Ею было запроектировано 268 км основных сварных швов. При возведении здания применялась как электродуговая, так и электрошлаковая сварка.



### 4 мая 1777



Родился Луи Жак Тенар (1777–1857) — французский химик, член Парижской Академии наук (1810), ее президент в 1823 г. Луи Жак Тенар — автор многочисленных работ в области химии и химической технологии. Первым из всех видов исследований им было изучено преобразование электрической энергии в тепловую — нагрев проводника протекающим током, которое было проведено в 1801 г. В основе многих видов сварочных технологий лежат исследования, первоначально проведенные Луи Жаком Тенаром.

### 5 мая 1961

Начался «Меркурий-Редстоун-3» — первый пилотируемый суборбитальный полет США. Астронавт Алан Шепард в ходе пятнадцатиминутного суборбитального полета по программе «Меркурий» пилотировал одноместный космический корабль «Freedom 7», выполненный в виде капсулы. Материал кабины — титаново-никелевый сплав. Объем кабины — 1,7 м³. Астронавт располагался в ложементе и находился в скафандре во время полета. При изготовлении корпуса корабля применялась контактная сварка. Оборудование предоставила фирма «Sciaky».



\* Материал подготовлен компанией ООО «СТИЛ ВОРК» (г. Кривой Рог) при участии редакции журнала. Календарь публикуется ежемесячно, начиная с выпуска журнала «Автоматическая сварка» № 11, 2017 г.

**6 мая 1912**



Родился Юрий Гаврилович Деревянко (1912–1994) — инженер-судостроитель, заместитель Председателя Государственного комитета Совета Министров СССР по судостроению, заместитель министра судостроительной промышленности СССР. В предвоенные годы руководил проектированием и отработкой опытной подводной лодки со сварным корпусом. Во время войны работал главным конструктором и главным инженером судостроительных заводов в Ленинграде, где под его руководством разработаны проекты и обеспечено строительство самоходных плашкоутов и тендеров для ладожской «Дороги жизни». Одновременно велось строительство сварных морских охотников типа БМО и морских бронекатеров.

**7 мая 1950**

В мае 1950 г. под руководством Евгения Оскаровича Патона спроектирована конструкция и разработана технология строительства наибольшего в Европе цельносварного моста через Днепр в Киеве (ныне мост им. Е. О. Патона).



**8 мая 1915**



Родился Владислав Эдуардович Моравский (1915–1990) — представитель Патоновской школы. Им были заложены основы применения нового перспективного процесса соединения металлов — конденсаторной сварки. Более 40 лет он посвятил изучению теоретических проблем, связанных с разрядом конденсаторов, а также решению технологических задач и созданию оборудования для конденсаторной и лазерной микросварки. Результаты исследований были реализованы на многих заводах бывшего Советского Союза.

**9 мая 1981**

В День Победы был открыт монумент-скульптура «Родина-мать», самая большая статуя в Украине (17-я в мире). Фигура женщины со щитом и мечом в руках облицована листами нержавеющей стали. Высота статуи от пьедестала до краешка клинка — 62 м, абсолютная высота — 102 м, масса — около 500 т. В первый раз в СССР скульптура подобных масштабов была изготовлена на Киевском заводе им. Парижской Коммуны при техническом сопровождении специалистами ИЭС им. Е. О. Патона. При изготовлении выполнено свыше 30 км сварных швов.



**10 мая 1942**



Родился Дмитрий Александрович Лачинов (1842–1902) — русский физик, электротехник. Ученый предложил промышленный способ добывания водорода и кислорода при помощи электролиза воды. В своих патентах Д. А. Лачинов предусматривал получение и предлагал конструкцию ванн с монополярными и биполярными электродами. В 1887 г. впервые в мировой практике Д. А. Лачинов вместе с Н. Н. Бенардосом осуществил подводную дуговую резку угольным электродом в лабораторных условиях.

**11 мая 1915**

Адольф Мессер (1853–1921) получает один из своих патентов на сварку. Адольф Мессер начал производство ацетиленовых генераторов и светильников в городке Хехст, недалеко от Франкфурта-на-Майне, организовав собственную компанию. В 1903 г. компания разработала первый резак, работающий на кислородно-ацетиленовой смеси. В период с 1924–1950 гг. разработано и налажено производство оборудования для электросварки. В настоящее время в компании Messer Group на 120 заводах работает около 4700 сотрудников, разработано более 150 прикладных технологий, выпускается более 130 газов и газовых смесей.

**12 мая 1903**

Немецкий инженер и ученый Карл Фон Линде (1842–1934) разработал и запатентовал технологию охлаждения и разделения газов, активно применяющихся в сварочной технологии, особенно в автогенном деле. Кроме этого, Карл Фон Линде основал в 1878 г. компанию «Linde», которая активно изучала технологию дуговой, плазменной сварки. В результате исследований, связанных со смешиванием кислорода и азота, в 1904 г. появляется ацетиленовая горелка.

**13 мая 1940**

Первый экспериментальный полет вертолета Vought Sikorsky VS-300 (S-46) — первого опытного вертолета конструкции Игоря Ивановича Сикорского (1889–1972) — выдающегося авиаконструктора, ученого, изобретателя, философа. В 1910 г. в Киеве он поднял свой первый винтокрылый аппарат. В 1941 г. по заказу армии США И. Сикорский спроектировал двухместный вертолет для связи и наблюдения, который был первым в мире вертолетом, запущенным в крупносерийное производство, и единственным вертолетом во время Второй мировой войны. Все основные несущие элементы конструкции корпуса были сварными.

**14 мая 1966**

Карл-Хайнц Стегирволд построил и запатентовал первую электронно-лучевую камеру для обработки металлов. В 1963 г. Стегирволд основал компанию «Steigerwald Strahltechnik GmbH». Компания поставляет созданные на базе универсальной концепции вакуумные установки. Камеры различных размеров, оснащенные модульным механическим и электронным оборудованием, комбинируются с электронно-лучевыми генераторами различной мощности. Основная область применения — сварка больших изделий со сложной геометрией сварного шва или зоной обработки.

**15 мая 2006**

Открыта скульптура «Cloud Gate» — расположенная в деловом квартале Чикаго, США. Автор — британский художник индийского происхождения Аниш Капур (родился в 1954 г.). Скульптура состоит из 168 пластин нержавеющей стали, сваренных вместе, отполированных до такой степени, что ее внешняя поверхность не имеет видимых швов. Размеры скульптуры — 10 (высота), 20 (длина) и 13 (ширина) метров, вес — порядка 100 т. Сварщики использовали гибридную лазерно-дуговую сварку. «Облачные врата» — один из самых знаменитых и узнаваемых памятников современности. Считается, что образ скульптуры был навеян видом капли ртути.



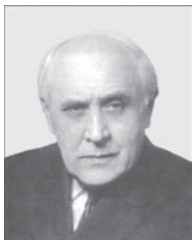


16 мая 1901

Началась третья арктическая экспедиция на корабле «Ермак». Первый в мире ледокол арктического класса водоизмещением 15000 т был заложен в Ньюкасле на стапелях английской фирмы «Armstrong Whitworth» по заказу России. В соответствии с замыслом адмирала С. О. Макарова, на корабле кроме обычных трех кормовых винтов был носовой винт, предназначенный не только для создания тяги, но и для разгона льдов. При испытаниях обнаружилось, что эта функция не выполняется и верфь получила заказ заменить передний винт колесом. Носовая часть ледокола была демонтирована, а на ее место приварена новая. Ледокол показал отличные мореходные качества и долгие годы работал в тяжелых ледовых условиях.



17 мая 1892



Родился выдающийся инженер Константин Вацлавович Петрань (1892–1976), создатель серии уникальных электродов с фтористым кальциевым покрытием УОНИ-13 для сварки и наплавки. Электроды этой серии вот уже более 75 лет широко применяются во многих областях промышленности стран СНГ при сварке конструкций ответственного назначения.

18 мая 1992



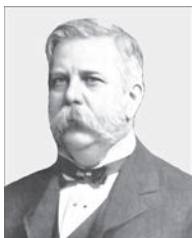
Скончался Георгий Александрович Николаев (1903–1992) — советский ученый, академик, ректор МВТУ им. Н. Э. Баумана, Герой Социалистического Труда. Георгий Александрович впервые установил основные характеристики вибрационной прочности сварных конструкций и разработал технические условия на их проектирование. Его работы послужили научной основой для повсеместного внедрения в СССР сварки вместо клепки в конструкциях промышленных сооружений, при изготовлении котлов и вагонов.

19 мая 2008

Состоялся первый полет самолета «Sukhoi Superjet 100», разработанный компанией «Гражданские самолеты Сухого» (Россия). Для производства сварной балки титанового пилона этого самолета была приобретена установка ЭЛС КЛ-138 (разработка ИЭС им. Е. О. Патона) для электронно-лучевой сварки. Отличительной особенностью этой установки является возможность косметического заглаживания корневой части швов, в том числе в труднодоступных удаленных местах. Для этого осуществляется поворот пучка электронов на 90°.



20 мая 1890



Опубликован один из патентов на сварку Джорджа Вестингауза — американского промышленника, инженера и предпринимателя, основателя компании «Вестингауз Электрик». Его фирма была одним из пионеров разработки сварочных материалов и аппаратов для сварки. В 1909 г. он создал генератор постоянного тока, чем во многом сделал применение сварки более доступным.

**21 мая 1866**

Родился Якоб Кнаппих — один из основателей компании «KUKA Systems GmbH». В 1889 г. Йохан Йозеф Келлер совместно с Якобом Кнаппих основывают ацетиленовый завод для производства недорогих систем для освещения зданий и улиц, бытовых приборов и автомобильных фар. Разработка и производство оборудования для контактной сварки началось в 1936 г. В 1956 г. «KUKA» выпускает первые автоматические сварочные линии, осуществляет поставку первой линии многоточечной сварки для компании «Volkswagen AG». Сегодня компания является крупнейшим поставщиком гибких автоматизированных решений, в том числе роботов для сварки.

**22 мая 2012**

Открытие «Tokyo Skytree» (Токийское небесное дерево) — телевизионной башни в районе Сумида (Токио, Япония) — самой высокой телебашни в мире высотой 634 м и второго по высоте сооружения в мире после «Бурдж-Халифа». Вся конструкция башни состоит из элементов «решетки», каждая из которых является комбинацией треугольников, в составе других составляющих. Эти элементы соединяются с помощью суставов ветвления, труб. Все конструкции соединяются сваркой непосредственно к главной опоре, без использования каких-либо других крепежных систем или методов. Этот тип соединения имеет очень простой внешний вид и имеет высокую сейсмостойчивость.

**23 мая 1949**

В городе Лахти (Финляндия) основана компания «Veljekset Kemppe Oy» («Товарищество братьев Кемппи»). В середине 1960-х гг. компания «Veljekset Kemppe Oy» выпустила на рынок свой первый аппарат для сварки MIG/MAG. В 1990 г. «Кемппи» стала первым в мире производителем сварочных аппаратов, получившим сертификат качества ISO 9001. Компания первая в мире создала инверторный источник питания и стала первым производителем, использующим цифровую технологию сварки.

**24 мая 1900**

Спущен на воду российский крейсер «Аврора». История создания этого корабля начинается с технологии клепки. После многих лет стоянки у Петроградской набережной в качестве музея-памятника «Аврора» пришла в аварийное состояние. Было решено заменить поврежденные элементы корпусных конструкций. Клепка при «реставрации» не применялась, в противном случае могли не успеть к юбилею корабля. На помощь пришла технология сварки с имитацией заклепочных соединений, с помощью которой и провели ремонт.

**25 мая (пятница) 2018**

В последнюю пятницу мая все сварщики отмечают свой профессиональный праздник — День сварщика. Профессия сварщика пришла в нашу жизнь с древних времен. А сегодня практически невозможно найти конструкцию, которая изготавливалась бы без помощи сварки.



**26 мая 1970**

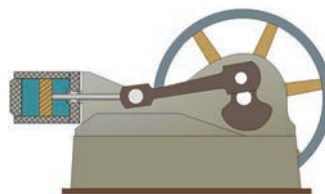
Лайнер «Ту-144» преодолел символический рубеж в 2 Маха, совершив полет на высоте 16300 м со скоростью 2150 км/ч. Советский «Ту-144» стал первым типом сверхзвуковых лайнеров, который использовался для коммерческих перевозок и превысил скорость звука. Конструкция лайнера была на 20 % сделана из титана. По всей задней кромке крыла располагались элероны, выполненные из титановых сплавов. Применение в конструкции титановых сплавов потребовало создания новых станков и сварочного оборудования. Эти проблемы вместе с ОКБ А. Н. Туполева решали специалисты ЦАГИ, ЦИАМ и других организаций.

**27 мая 1934**

Родился Владимир Михайлович Кудинов, представитель Патоновской школы. Ученый проводил исследования, связанные с физико-механическими явлениями при обработке металлов взрывом. Под руководством В. М. Кудинова выполнен комплекс фундаментальных исследований, связанных с созданием физической теории явления волнообразования при сварке взрывом. Они послужили основанием для выделения отдельного класса сварочных процессов, которые получили название конструкционной сварки взрывом, выполняемой на деталях и изделиях. В области резки взрывом ему принадлежат разработки по созданию конструкции удлиненных кумулятивных зарядов, их оптимизации и разработки безопасной технологии изготовления.

**28 мая 1896**

Российский инженер, изобретатель метода электрической дуговой сварки металлов Николай Гаврилович Славянов (1854–1897) подал заявку на изобретение и вскоре получил привилегии на «Способ электрического уплотнения металлических отливок». В 1888 г. русский инженер Н. Г. Славянов впервые в мире применил на практике дуговую сварку металлическим электродом под слоем флюса. В присутствии государственной комиссии он сварил коленчатый вал паровой машины в одном из цехов Пермских пушечных заводов. Свое изобретение инженер Славянов назвал «электрической отливкой металлов».

**29 мая 1829**

Скончался Гемфри Дэви (1778–1829) – английский химик, физик и геолог, один из основателей электрохимии. Независимо от В. В. Петрова, но несколько позже (1809), он получил электрическую дугу. Открытие электрической дуги некоторое время приписывалось Гемфри Дэви и она была известна под названием «вольтовой дуги». Дэви сталкивал два заостренных угольных электрода, соединенных с полюсами батареи, состоящей из 2000 элементов. Благодаря огромному выделению тепла уголи накалялись докрасна. Когда Дэви отдалял их концы друг от друга, ток продолжал передаваться через воздушный промежуток, распространяя ослепительный свет, получивший название света Дэви или вольтовой дуги.

**30 мая 2012**

Был спущен на воду корвет «Стойкий». Этот проект — одна из последних разработок российского кораблестроения. Сначала с помощью резки производили детали необходимой формы, а затем при помощи сварки соединяли секции корпуса. При строительстве было использовано современное сварочное оборудование для автоматической сварки под флюсом, полуавтоматической сварки в среде защитных газов, аргонодуговой сварки и ручной электродуговой сварки.

**31 мая 1920**

Произведен спуск на воду «Мацу» — линкора японского императорского флота, второго корабля типа «Нагато». Корабли типа «Нагато» являются первыми полностью спроектированными и построенными на верфях Японии линкорами. Они создавались на основе концепции быстроходных линкоров. В соответствии с последними достижениями техники относительно новая технология дуговой сварки широко использовалась при строительстве корабля, обеспечивая долговечность и прочность брони. В частности, при помощи этой технологии была дополнительно укреплена нижняя часть броневых поясов.

