

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,  
А. Т. Зельниченко,  
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),  
Ю. Н. Ланкин,  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
О. К. Назаренко, В. Д. Позняков,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко**МЕЖДУНАРОДНЫЙ****РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**Н. П. Алешин (Россия)  
Гуань Цяо (Китай)  
А. С. Зубченко (Россия)  
М. Зиниград (Израиль)  
В. И. Лысак (Россия)  
У. Рейген (Германия)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Я. Пиллярчик (Польша)  
О. И. Стеклов (Россия)  
Г. А. Туричин (Россия)**УЧРЕДИТЕЛИ:**Национальная академия наук Украины,  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,  
МА «Сварка» (издатель)**Адрес редакции:**ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ  
03680, Украина, Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com  
URL: www.rucont.ru**Редакторы:**Т. В. Юштина, И. Ф. Соколова  
Электронная верстка:  
И. Р. Наумова, А. И. Сулима,  
Д. И. СередаСвидетельство о государственной  
регистрации KB 4788 от 09.01.2001  
ISSN 0005-111XЖурнал входит в перечень  
утвержденных Министерством  
образования и науки Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степенейЖурнал переиздается  
на английском языкеИЭС им. Е. О. Патона под названием  
«The Paton Welding Journal»  
ISSN 0957-798X**The Paton  
WELDING JOURNAL**За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет  
Цена договорная**СОДЕРЖАНИЕ****НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

- Бернацкий А. В.* Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) ..... 3
- Борисов Ю. С., Вигилянская Н. В., Демьянов И. А., Грищенко А. П., Мурашов А. П.* Исследование влияния режимов электро-дугового напыления на структуру и свойства псевдосплавных покрытий ..... 11
- Маркашова Л. И., Тюрин Ю. Н., Колисниченко О. В., Валевич М. Л., Богачев Д. Г.* Влияние структурных параметров на механические свойства стали Р6М5 в условиях упрочняющей поверхностной обработки ..... 18
- Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Демченко Ю. В.* Оптимизация химического состава и структуры металла ремонтных швов при исправлении дефектов в сварных соединениях труб с применением многослойной сварки ..... 24
- Чигарев В. В., Коваленко И. В.* Влияние остаточных напряжений в сварных соединениях двухслойных сталей на эксплуатационную надежность металлоконструкций ..... 31

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

- Лобанов Л. М., Кирьян В. И.* Шестьдесят лет цельносварному мосту им. Е. О. Патона ..... 35
- Литвиненко С. Н., Шаповалов К. П., Савченко И. С., Косинов С. Н., Ющенко К. А., Лычко И. И., Козулин С. М.* Системы управления процессом и мониторинг режимов — важные факторы обеспечения качества при электрошлаковой сварке металла большой толщины ..... 41
- Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б., Назарчук А. Т., Ивочкин Ю. П., Виноградов Д. А.* Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки ..... 45
- Гавриш П. А., Шепотько В. П.* Влияние конструктивных особенностей сварных узлов перегружателя на его работоспособность ..... 51

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

- Диссертации на соискание ученой степени ..... 55
- Новые книги ..... 56, 74

**ХРОНИКА**

- Научно-техническая конференция «ПАЙКА-2013» ..... 57
- Осенние сварочные премьеры 2013 г. .... 58
- О. И. Гуце — 90 ..... 61
- К 100-летию со дня рождения Г. В. Петрова ..... 62
- ИНФОРМАЦИЯ**
- Программы профессиональной подготовки на 2014 г. .... 63
- Указатель статей за 2013 г. .... 66
- Указатель авторов ..... 70
- ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона — ОАО «Турбоатому» ..... 73
- Мировая премьера на выставке «Сварка и резка – 2013» —  
AssuPocket ..... 75

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНТИ РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

## EDITORIAL BOARD:

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

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

## THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

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

## FOUNDERS:

National Academy  
of Sciences of Ukraine,  
Paton Welding Institute,  
IA «Welding» (publisher)

## Address of Editorial Board:

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

## Editors:

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

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001  
ISSN 0005-111X

All rights reserved

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

The journal is published in English  
by the E. O. Paton Electric Welding Institute  
under title «The Paton Welding Journal»  
ISSN 0957-798X

**The Paton**  
WELDING JOURNAL

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

## CONTENTS

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Bernatsky A. V. Laser surface alloying of steel products (Review)</i> .....	3
<i>Borisov Yu. S., Vigilyanskaya N. V., Demyanov I. A., Grishchenko A. P., Murashov A. P. Study of effect of electric arc spraying conditions on structure and properties of pseudo-alloy coatings</i> .....	11
<i>Markashova L. I., Tyurin Yu. N., Kolisnichenko O. V., Valevich M. L., Bogachev D. G. Effect of structure parameters on mechanical properties of steel R6M5 under conditions of strengthening surface treatment</i> .....	18
<i>Rybakov A. A., Filipchuk T. N., Demchenko Yu. V. Optimization of chemical composition and structure of metal of repair welds in remedy of defects in welded joints of pipes by using multilayer welding</i> .....	24
<i>Chigarev V. V., Kovalenko I. V. Effect of residual stresses in welded joints of two-layer steels on in-service reliability of metal structures</i> .....	31

### INDUSTRIAL

<i>Lobanov L. M., Kiryan V. I. 60 years of the E. O. Paton all-welded bridge</i> .....	35
<i>Litvinenko S. N., Shapovalov K. P., Savchenko I. S., Kosinov S. N., Yushchenko K. A., Lychko I. I., Kozulin S. M. Process control systems and monitoring of conditions are the main factors of quality assurance in electroslag welding of massive metal</i> .....	41
<i>Protokovilov I. V., Porokhonko V. B., Nazarchuk A. T., Ivochkin Yu. P., Vinogradov D. A. Methods of generation of external magnetic fields for control of electroslag welding</i> .....	45
<i>Gavrish P. A., Shepotko V. P. Effect of design features of welded components of cargo handling equipment on its serviceability</i> .....	51

### BRIEF INFORMATION

Theses for scientific degree .....	55
New books .....	56, 74

### NEWS

Scientific-Technical Conference «BRAZING-2013» .....	57
Autumn welding premiers — 2013 .....	58
O. I. Gushcha is 90 .....	61
Towards the 100th birthday anniversary of G. V. Petrov .....	62
INFORMATION	
Programs of professional training for 2014 .....	63
Index of articles for 2013 .....	66
Index of authors .....	70
The E. O. Paton of Welding Equipment for OJSC «Turboatom» .....	73
World premier at the exhibition «Welding and Cutting – 2013» — AccuPochet .....	75

«Avtomaticheskaya Svarka» journal abstracted & indexed in Ukrainian refereed journal «Source», RJ VINITI «Welding» (Russia), «Welding Abstracts», ProQuest (UK), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (USA), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (France); Presented in Russian Science Citation Index & «Google Scholar»; Abstracted in «Welding Institute Bulletin» (Poland) & «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy); Covered in the review of the Japanese journals «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».



УДК 621.785.5: 621.9.048.7

## ЛАЗЕРНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ (Обзор)

А. В. БЕРНАЦКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнен анализ литературы, посвященной лазерному поверхностному легированию стальных изделий. Исследованы процессы, происходящие при формировании структуры поверхностных слоев при лазерном легировании сталей. Приведены примеры практического применения лазерного поверхностного легирования сталей различными материалами и смесями. Показано, что при лазерном легировании обеспечивается возможность формирования поверхности стальных изделий, которые имеют высокий уровень твердости, теплостойкости, износостойкости, коррозионной стойкости и других физико-механических характеристик. Установлено, что работы, выполненные в этом направлении, не носили системного характера, а зачастую были направлены на решение локализованной задачи повышения эксплуатационных характеристик отдельно взятого материала или деталей из него. Поэтому полученные разными авторами результаты не поддаются систематизации из-за существенных различий в схемах и условиях проведения исследований. Библиогр. 50, рис. 2.

*Ключевые слова:* лазерное легирование, схема, процесс, зона легирования, сталь, легирующие материалы, промышленное внедрение

С ростом требований к качеству рабочего слоя [1, 2], показателям экономической эффективности процессов [3], подбору материалов в зависимости от поверхностных свойств и сечения деталей, а также вследствие увеличения объемной доли комплекснолегированных сталей в процессе производства деталей и инструмента, становятся актуальными задачи применения ресурсосберегающих технологий для повышения эксплуатационного ресурса нагруженных стальных изделий, например, поверхностным легированием [4].

Легирование (от лат. *ligo* — связываю, соединяю) — введение добавок (металлов, неметаллов и их соединений) в металлы, сплавы и полупроводники для придания им определенных физических, химических, механических свойств [5]. При легировании металлов и сплавов могут образовываться твердые растворы, смеси двух и более фаз, интерметаллиды, карбиды, нитриды, оксиды, сульфиды, бориды и другие соединения легирующих элементов с основой сплава или между собой [4, 5].

В результате легирования существенно меняются физико-химические характеристики исходного металла или сплава и прежде всего электронная структура [5]. Легирующие элементы влияют на температуру плавления, характер дефектов кристаллической решетки, на формирование зерен и тонкой кристаллической структуры, область существования аллотропических модификаций и кинетику фазовых превращений, на дислокационную структуру, жаростойкость и коррозионную стойкость, электрические, магнитные, механические,

диффузные и многие другие свойства сплавов [3–8].

Легирование подразделяют на объемное и поверхностное [5]. При объемном легировании легирующий элемент в среднем статистически распределяется в объеме металла. В результате поверхностного легирования легирующий элемент концентрируется на поверхности металла. Легирование сразу несколькими элементами, определенное содержание и соотношение которых позволяет получить необходимый комплекс свойств, называют комплексным легированием и соответственно сплавы — комплекснолегированными. Например, в результате легирования аустенитной хромоникелевой стали вольфрамом ее жаропрочность возрастает в 2...3 раза, а при совместном использовании вольфрама, титана и др. элементов — в 10 раз [5].

В основе большинства традиционных процессов поверхностного легирования сталей (в сочетании с термической обработкой) лежит диффузное насыщение элементами из газовой или жидкой фазы и химическое осаждение из газовой фазы [9]. Общее название этих методов — химико-термическая обработка (ХТО). К таким процессам относят алитирование (легирующий элемент алюминий), цементацию (легирующий элемент углерод), цианирование (легирующие элементы углерод и азот), азотирование (легирующий элемент азот), борирование (легирующий элемент бор) и т. д. [5, 9].

Однако перечисленные методы ХТО имеют ряд общих существенных недостатков как по технологии процесса, так и по свойствам легирован-



ного слоя. К числу основных недостатков, ограничивающих применение этих способов как методов обработки, упрочняющих поверхность, можно отнести [10]:

— большую продолжительность операции (например, скорость насыщения углеродом порядка  $2,8 \cdot 10^{-5}$  мм/с, а для получения азотированного слоя толщиной 0,5 мм в конструкционных сталях при 773...793 К нужно потратить 50...70 ч), следствием чего является малая производительность процесса;

— деформацию и коробление под действием напряжений, создаваемых условиями нагрева во время технологического процесса и последующего охлаждения и, как следствие, необходимость в дополнительных операциях механической обработки;

— хрупкость и отшелушивание внешней части обработанного слоя.

Также недостатками перечисленных выше методов ХТО является небольшая толщина легированного слоя и плохая его связь со структурой базового металла. При форсированных режимах эксплуатации легированный слой быстро срывается с поверхности детали.

В связи с растущими эксплуатационными требованиями к тяжело нагруженным деталям различных узлов и механизмов актуальными становятся задачи повышения жаростойкости и трещиностойкости. Однако обычная ХТО с закалкой и отпуском хотя и влияет на свойства изделия, во многих случаях явно недостаточна. Она в наибольшей степени подходит для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и в меньшей степени для повышения жаростойкости, а

также сопротивления возникновению и распространению трещин [5].

Применение перечисленных выше методов поверхностного легирования в значительной степени связано с историей развития машиностроения в развитых странах. Сама эволюция этих методов была вызвана стремлением повысить эксплуатационные качества поверхностных слоев нагруженных стальных изделий. На современном этапе развития техники и технологии особое внимание вызывают новые методы поверхностного легирования, позволяющие устранить перечисленные недостатки указанных выше методов [10]. В основе этих новых методов лежит использование локальных источников нагрева. Для модифицирования поверхности металлов предпочтение отдается таким методам, которые используют в качестве теплового источника концентрированные потоки энергии: лазерные, ионные, ультразвуковые и другие.

Лазерные технологии позволяют успешно решать проблему создания материалов с заданным комплексом свойств путем целенаправленного формирования структуры [10–50]. При лазерном легировании появляется возможность формировать такие поверхностные слои, которые имеют высокий уровень твердости [10–12], теплостойкости [10, 13, 14], износостойкости [10, 15–17], коррозионной стойкости [10, 18] и других характеристик [10–20]. Процессы локального легирования реализуются посредством как импульсного [6, 10–13, 17], так и непрерывного [6, 8, 10, 12–20] лазерного излучения. При этом могут применяться различные схемы обработки «с перекрытием» [10, 12, 13, 15–17, 19, 20] и без него [6, 10–13, 17]. Результаты процесса зависят также от способа подачи в зону обработки легирующего материала [10, 12, 13, 17], вида легирующего элемента (элементов) [6, 8, 10–20], свойств матричного материала [10–13, 15, 17] и многих других факторов.

Поверхностное лазерное легирование заключается в получении легированных слоев с принудительной подачей присадочных материалов непосредственно в зону действия сфокусированного лазерного излучения. Схема процесса лазерного легирования показана на рис. 1 [12]. Образец с тонким слоем легирующей обмазки при движении под лазерным лучом локально оплавляется, легирующие компоненты переходят в объем жидкой ванны металла, которая затем кристаллизуется.

Исследования процесса лазерного поверхностного легирования [6, 8, 10–20] показывают, что лазерное излучение, направленное на обрабатываемую поверхность, частично поглощается присадочным и основным материалами, а частично отражается. Вследствие поглощения в зоне действия лазерного излучения начинает действовать интенсивный источник теплоты [10]. При плот-

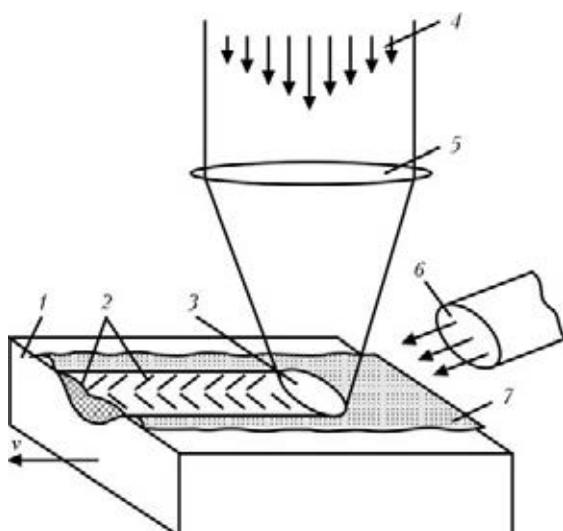


Рис. 1. Схема процесса лазерного легирования [12]: 1 — образец, движущийся со скоростью  $v$ ; 2 — легированная дорожка; 3 — ванна расплава; 4 — лазерный пучок; 5 — фокусирующая система; 6 — защитный газ; 7 — легирующая обмазка



ностях мощности излучения  $10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> происходит активный локальный разогрев присадочных материалов, при котором на поверхности ванны расплава (жидкой фазы) образуется парогазовая фаза [12]. При лазерном легировании происходят взаимосвязанные процессы теплопереноса и микрометаллургические процессы. При перемещении лазерного луча расплавленный металл вследствие явления теплопереноса (интегрального действия давления пара, разницы сил поверхностного натяжения в центральной и хвостовой частях ванны расплава, турбулентных течений расплава) оттесняется в хвостовую часть ванны [10]. В момент существования жидкого металла благодаря термокапиллярной конвекции Марангони происходит перемешивание расплавленной легирующей композиции с металлической матрицей [21]. При этом происходит насыщение поверхности сталей легирующими элементами из композиций, образование химических соединений, частичная гомогенизация в зоне жидкого металла [8, 10, 13]. При кристаллизации металла ванны расплава образуется легированный слой. При повышении плотности мощности излучения более  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается переход в режим кинжального проплавления, характеризующегося образованием парогазового канала в ванне расплава [10].

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие при формировании структуры поверхностных слоев при лазерном легировании сталей. В зависимости от теплофизических характеристик материала основы, а именно от теплопроводности, поверхность металла разогревается до разных температур [10, 13, 17, 22]. В случае, когда материал основы имеет низкий коэффициент теплопроводности, металл в ванне расплава разогревается до очень высоких температур. Глубина ванны расплава при этом небольшая. Концентрация легирующих элементов резко возрастает. При воздействии лазерного излучения на поверхность сталей, имеющих высокий коэффициент теплопроводности, глубина ванны расплава увеличивается, и, соответственно, содержание легирующих элементов в ванне снижается [10]. При этом температура в зоне оплавления оказывается ниже, чем в первом случае.

В связи с тем, что наибольшее распространение получили лазерные установки с гауссовым распределением энергии в лазерном пучке, в центре луча наблюдается максимум энергии, а к периферии луча его энергия уменьшается [10, 23]. Таким образом, в центре тепловой источник более сильно нагреет, чем на периферии. Следовательно, и металл оказывается нагретым тоже неравномерно [12, 13, 24]. Это способствует возникновению кругового характера движения жидкости, направленного от поверхности металла к периферии и

вглубь ванны расплава [10–13, 21, 23, 24]. Потoki жидкости как бы симметрично закручиваются в противоположные стороны, т. е. создаются два симметричных макровихря [12, 13, 21]. Они образуются в том случае, когда физико-химические и механические свойства жидкого металла по всей ванне расплава одинаковы. При дальнейшем перемещении теплового источника в пределах ванны расплава образуются несколько вихрей, так как свойства металла в зоне лазерного воздействия существенно отличаются [12]. С одной стороны, где к ванне расплава прилегает холодный, не нагретый лазерным лучом металл, теплоотвод осуществляется интенсивнее, чем со стороны металла, уже подверженного влиянию лазерного излучения. Таким образом, с одной стороны ванны расплава температурный градиент оказывается большим, чем с другой [11]. Движение металла происходит от областей с более высокой температурой к менее нагретым областям [12]. Вихревой характер движения жидкости приводит к ее интенсивному перемешиванию, что способствует получению гомогенной структуры [10]. При этом высокие температуры в сочетании с малым временем позволяют сохранить высокую концентрацию легирующих компонентов [10–20].

Все экспериментальные данные показывают достаточно однородное распределение легирующей добавки по сечению жидкой ванны [10–20]. Это однозначно указывает на главную роль конвективного теплопереноса по сравнению с диффузионным [10]. Испарением металла (и соответственно давлением отдачи паров) при легировании пренебрегают [12], так как практически всегда процесс легирования идет ниже температуры кипения материала.

Зона обработки после лазерного легирования имеет строение, аналогичное строению зоны после лазерной закалки с оплавлением. Отличие заключается в том, что в металл расплавленной ванны вводят легирующие элементы. Диффузия элементов из зоны оплавления в зону термического влияния обычно происходит на глубину не более 10 мкм [10, 11]. Однако в некоторых случаях экспериментально обнаружено перераспределение легирующих элементов в твердой фазе под зоной оплавления на глубине 200...300 мкм [10, 12, 13, 17]. Это может быть вызвано образованием тонких каналов жидкой фазы по границам зерен и блоков в твердом металле и теплопереносом по этим каналам [12, 13, 17]. Процессы теплопереноса в твердой фазе также могут быть обусловлены дислокационным перемещением атомов в результате быстрых локальных деформаций [10, 12].

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий заключается в отсутствии слоистости [10]. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере



удаления от поверхности, перехода от фаз с большей концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит [10, 12, 13, 17]. Все фазы в легированной зоне по глубине перемешаны примерно равномерно [10].

Существуют следующие способы подачи легирующего элемента в зону лазерного воздействия [10, 12, 13]:

нанесение легирующего состава в виде порошка на обрабатываемую поверхность;

обмазка поверхности специальным легирующим составом;

легирование в жидкости (жидкой легирующей среде);

накатывание фольги из легирующего материала на обрабатываемую поверхность;

легирование в газообразной легирующей среде;

удержание ферромагнитных легирующих элементов на матричной поверхности магнитным полем;

нанесение легирующего состава газотермическими способами (например, газопламенным, плазменным, детонационным напылением и пр.);

электролитическое осаждение легирующего покрытия;

подача легирующего состава в зону обработки синхронно с лазерным излучением.

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки [10–13], которые определяют целесообразность его использования в конкретном случае, причем результаты, полученные при незначительных изменениях в технологических режимах и способе подачи материала, могут внести значительные коррективы в полученный результат. Так, в работах [25, 26] экспериментально исследовано влияние концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) на конвекцию расплава и результаты лазерного легирования. Показано [25], что добавление в легирующую обмазку селена или серы в качестве ПАВ позволило регулировать профиль поверхности и форму сечения легированных дорожек.

Исходя из целей лазерного легирования (повышение износостойкости, коррозионной стойкости, контактной выносливости и других служебных характеристик) [10], необходимо учитывать известные результаты работ по ХТО [1, 4, 5, 9]. Вместе с тем нельзя сразу сопоставлять процессы формирования легированного поверхностного слоя при оплавлении лазером [10–25] с процессами ХТО, при которых легирование идет как диффузия в твердой фазе. При лазерном легировании в результате «жесткого» термического цикла с большими скоростями нагрева и охлаждения характерно образование перенасыщенных метастабильных структур высокой дисперсности, что недостижимо при обычной ХТО [10].

Размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения [12] и толщины покрытия из легирующего материала. Как правило, легирование импульсным излучением обеспечивает меньшие размеры легированной зоны, чем при обработке непрерывным излучением [10–17]. В частности, если при импульсной обработке глубина зоны достигает 0,3...0,7 мм, то применение непрерывного излучения мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров и Nd:YAG-лазеров позволяет увеличить глубину зоны до 3 мм [10].

Большое количество научных трудов, посвященных использованию способа лазерного легирования широкой номенклатуры металлов и сплавов, появилось в последнее время благодаря работе многих научных коллективов. В качестве легирующих добавок традиционно используют три основные группы веществ: неметаллы, металлы и их соединения (например, карбиды) [10–22].

Легирование неметаллическими компонентами (например, углеродом, азотом, бором, кремнием) является альтернативой традиционным методам цементации, азотирования, борирования, силицирования [10, 12, 13, 17].

Легирование низкоуглеродистых сталей углеродом приводит естественным образом к формированию мелкозернистой структуры из мартенсита и остаточного аустенита, причем микротвердость достигает 9000 МПа [10, 14, 17].

Структурой сталей после лазерного азотирования является азотистый мартенсит, остаточный аустенит и нитриды железа [6, 10, 12, 27].

В структуре борированных лазером зон при небольшом содержании бора присутствуют  $\alpha$ -Fe и боридная эвтектика [10, 12, 13, 28]. При этом микротвердость составляет  $(6...12) \cdot 10^8$  МПа [10, 12, 13]. При увеличении концентрации бора в структуре появляется большое количество боридов ( $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ ), остаточный аустенит отсутствует, микротвердость резко повышается до  $(14...21) \cdot 10^8$  МПа [10, 13, 28]. Легированная поверхность с повышенным содержанием фазы  $\text{FeB}$  хорошо работает при абразивном износе, тогда как при ударном воздействии рекомендуется получать в структуре бориды  $\text{Fe}_2\text{B}$  и  $\text{Fe}_3\text{B}$  [12, 28].

При увеличении концентрации кремния при лазерном силицировании кроме  $\alpha$ -Fe в структуре зоны лазерного воздействия образуются силициды  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{FeSi}_2$  и микротвердость сталей увеличивается от  $8 \cdot 10^3$  до  $(14...15) \cdot 10^3$  МПа, значительно увеличиваются также теплостойкость, износостойкость и коррозионная стойкость [10, 12, 13, 19, 20].

Легирование чистыми металлами (алюминием [6, 10, 12, 13, 29], кобальтом [10, 12, 13, 30], хромом [6, 10–13, 30, 31], никелем [6, 10–13, 30, 32] и др.), а также сплавами на их основе приводит к формированию пересыщенных твердых раство-



ров и образованию интерметаллидов. Это способствует значительному росту микротвердости и износостойкости легированных слоев, улучшает сопротивление коррозии и повышает другие физико-механические характеристики изделий. Так, например, лазерная обработка способствует повышению износостойкости в 1,5...3,0 раза при поверхностном упрочнении с последующим азотированием; достигается наибольшая микротвердость и износостойкость низкоуглеродистых сталей азотированием поверхности, легированной алюминием [33]. Однако наличие повышенного содержания интерметаллидов снижает пластичность и охрупчивает легированный слой, что может привести к его преждевременному разрушению [6, 10, 17].

Наличие карбидов, боридов, силицидов, нитридов и их комбинаций в структуре материала позволяет существенно повысить его твердость и износостойкость, теплостойкость и коррозионную стойкость [6, 10–21, 34–36]. В частности, повышение износостойкости поверхностей трения деталей фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением обеспечивается лазерным легированием с обмазкой (15 % Fe + 30 % Ni + 20 % В + 10 % Si + 25 % жидкого стекла) в атмосфере азота на режиме ( $q = 0,31 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $v = 33$  мм/с) [36]. При этом снижается износ штока и втулки соответственно в 3,44 и 3,21 раза.

Ниже приведены примеры практического применения лазерного легирования стальных изделий различными материалами и смесями. Технология лазерного легирования освоена в ЗАО «Сибур-Химпром» (г. Пермь) для упрочнения поверхности деталей, работающих при различных видах износа [11]. В работах [11, 22, 37] показано, что в результате лазерного легирования композицией (В<sub>4</sub>С + Сг) на поверхности плунжеров насосно-компрессорного оборудования, изготовленных из сталей 10, 20, 15Х, 12ХН3А и 12Х2Г2НМФТ формируются слои глубиной 0,15...0,25 мм. Микро-рентгеноспектральным анализом установлено [37], что после лазерной обработки происходит интенсивное насыщение поверхностных слоев легирующими элементами, например, содержание хрома в слоях возрастает в 9...13 раз. В фазовом составе слоев присутствуют сильно пересыщенные твердые растворы на основе альфа и гамма модификаций железа, а также бориды и карбиды хрома и железа. Установлено, что скорость коррозии легированных слоев уменьшается в 3...8 раз (соответственно для 573 и 1173 К), по сравнению со скоростью коррозии слоев, не подвергавшихся обработке [11]. Испытания на износ в условиях трения скольжения показали, что износостойкость легированных слоев увеличилась в 1,5...7,0 раз по сравнению с необработанными лазерным излучением поверхностями [11, 22]. Таким образом было установлено, что использова-

ние лазерного легирования позволяет увеличить срок службы деталей оборудования в 2...4 раза за счет повышения их служебных свойств [11, 22, 37].

Авторами работы [38] проводились исследования по лазерному легированию стальной поверхности молибденом для снижения величины износа разного инструментального оборудования. В ходе исследования молибден предварительно наносили на стальные поверхности плазменным напылением, а затем оплавливали с помощью непрерывного излучения Nd:YAG-лазера. Для мониторинга процесса использовали видеокамеру, оборудование для анализа звука и группу пирометров. Система мониторинга процесса использовала соответствующую среду для определения взаимодействия «пучок/материал». Например, благодаря использованию звукового анализа выбросов, можно было качественно оценивать спады интенсивности при легировании. Измерение температуры поверхности расплава с использованием пирометра позволило вносить корреляцию по содержанию молибдена в легированные зоны, что играет важную роль и связано с получаемой трещиностойкостью и интенсивностью износа [38].

Среди многообразия инструментов особыми условиями работы выделяются разделительные штампы, матрицы и пуансоны которых подвергаются ударной нагрузке, высоким контактным давлениям, достигающим 1500 МПа при скоростях деформирования 0,1...5,0 м/с. В работах [39, 40] выполнены исследования закономерностей ударного износа рабочих поверхностей матриц и пуансонов разделительных штампов, изготовленных из сталей У8 и Х12М, которые были легированы смесями на основе соединений бора, кремния и углерода. Обеспечено внедрение разработанных рекомендаций по лазерному борокарбосилицированию в производство на заводе «Электродеталь» и Брянском заводе технологического оборудования, в результате чего достигнуто повышение износостойкости инструментов в 1,5...3,0 раза [39].

Лазерное легирование деталей штамповой оснастки для горячего деформирования (рис. 2) выполнено [41–44] во Фраунгоферовском институте (Fraunhofer Institut für Produktions technologie IPT, Aachen). Авторами работы [41] установлено, что добавление при лазерном легировании в качестве легирующих элементов молибдена и карбида ванадия значительно увеличивает твердость штампового инструмента и повышает жаропрочность, но не существенно влияет на износостойкость. Показано [41], что при дополнительном легировании марганцем можно улучшить износостойкость поверхностных слоев деталей, которые подвергаются воздействию большой нагрузки. В работах [42–44] лазерное легирование стали 1.2365

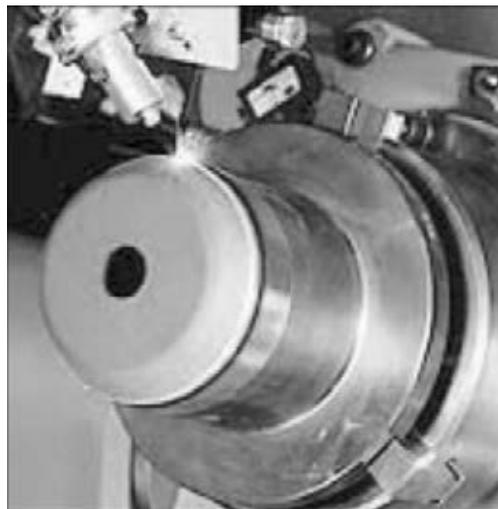


Рис. 2. Лазерное легирование элементов штамповой оснастки для горячего деформирования, изготовленных из стали 1.2365 (X32CrMoV3-3) [42]

(X32CrMoV3-3) выполнено карбидом титана, карбидом вольфрама и кобальтом. Проведенные натурные испытания позволили установить, что износостойкость штамповой оснастки, которая прошла лазерное легирование, повысилась на 67 % по сравнению с необработанной оснасткой [42–44]. Кроме этого, важным является то, что также возросло время эксплуатации оснастки после лазерного легирования, что также позволило сократить расходы и повысить объемы производства [42–44].

На российских предприятиях г. Нижний Новгород ООО «Гидротермаль» и ОАО «Инженерный центр» при изготовлении и обработке элементов конструкции энергетических установок типа штуцер, фланец, втулка, поворотный клапан и других, изготавливаемых из стали 38Х2МЮА, используется лазерное легирование смесями порошков хрома, молибдена, алюминия и  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ , а также алюминия и  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  [45, 46]. Установлено [45], что легированные зоны имеют тонкий слой дендритного строения. Это слой, обогащенный алюминием и, вероятно, нитридом алюминия. При проведении испытаний установлено, что наибольшую износостойкость имеют не верхние слои, а расположенные на некоторой глубине. Авторы работы [45, 46] предполагают, что это связано с диффузией азота во внутренние слои обрабатываемой зоны и образованием нитридов алюминия. Износостойкость стали 38Х2МЮА после лазерного легирования смесью порошков увеличивается, причем смесь Cr–Mo–Al– $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  обеспечивает повышение сопротивления поверхности износу в 6,5...9,5 раза, а смесь Al– $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  увеличивает износостойкость в 2,86...3,58 раза при поверхностного слоя [45, 46].

Прессы для глубокой вытяжки, которые используются для формирования стандартного листа металла в автомобильной промышленности

должны выдерживать экстремальные нагрузки и даже после большого количества операций они должны сохранять свою точность и размеры. Расходы на ремонт и потери продукции приводят к удорожанию этих изделий, поэтому существует заинтересованность промышленных пользователей в увеличении срока службы инструмента. В зависимости от цели упрочнения при процессе лазерного легирования карбидом вольфрама поверхности кузнечного инструмента, благодаря высокой точности технологии лазерного легирования, обеспечивается защита от износа металлических инструментов в отдельных локальных зонах [47]. Во Фраунгоферовском институте в тесном сотрудничестве с компанией «HB Seissenschmidt AG» благодаря таким технологиям достигается увеличение сроков службы инструмента до 500 % по сравнению с традиционными методами обработки [47].

Исследование структуры и свойств большой номенклатуры деталей из сталей 45, У8А и 6ХС при лазерном легировании никелем, молибденом, хромом, бором и боридом вольфрама при непрерывном лазерном воздействии выполнено в работах [48–50]. Обнаружено влияние состава и толщины легирующей обмазки на формирование глубины зоны легирования [48]. Установлены оптимальные параметры [48–50], разработана и внедрена технология лазерного легирования на предприятиях различных отраслей (ОАО «Завод «Красное Сормово», ОАО «Павловский автобус», ОАО «Горьковский металлургический завод», ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Нижегородский авиастроительный завод «Сокол»). Благодаря использованию технологии лазерного легирования в 1,5...2,0 раза возросла износостойкость поверхностного слоя изделий (ножи, скалки, оси, втулки и др.) при одновременном снижении затрат на используемые материалы [48].

## Выводы

1. Перспективность применения в различных отраслях промышленности результатов лазерного поверхностного легирования отмечается многими авторами. Однако несмотря на несомненный научный и практический интерес лазерные технологии поверхностной обработки в настоящее время не получили должного развития и внедрения. Причиной этого является недостаточная изученность общих закономерностей изменения свойств обрабатываемых сталей в зависимости от фазового и структурного состояния при легировании различными материалами в условиях сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения, что сдерживает разработку конкретных рабочих технологий и рекомендаций прикладного характера.



2. Работы, выполненные в области лазерного легирования стальных изделий, часто были направлены на решение локализованной задачи повышения эксплуатационных характеристик отдельно взятого материала или деталей из него. Поэтому полученные разными авторами результаты не поддаются систематизации из-за существенных различий в схемах и условиях проведения исследований. Во многом это объясняется отсутствием принципов управления структурообразованием при формировании в поверхностном слое сталей структуры, обеспечивающей высокий уровень характеристик конструкционной прочности, которые лежат в основе разработки таких технологий.

1. *Петренко К. П.* Структурная модель проектирования упрочняющих технологических процессов, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 1. — С. 7–9.
2. *Влияние* предварительной подготовки поверхностей изделий на качество покрытий, полученных лазерной наплавкой / М. Д. Павлов, Т. В. Тарасова, А. П. Назаров, А. А. Окунькова // Там же. — 2012. — № 12. — С. 31–34.
3. *Экономическая* эффективность высоких технологий на примере лазерного производства / Ю. Ф. Назаров, А. В. Иванайских, П. В. Точилин, И. В. Сорокина // Свароч. пр-во. — 2010. — № 3. — С. 48–50.
4. *Модифицирование* структуры композиций с защитными покрытиями путем легирования и высокоэнергетического воздействия / Ю. Н. Сараев, В. П. Безбородов, В. Г. Дураков и др. // Там же. — 2012. — № 12. — С. 10–13.
5. *Гуляев А. П.* *Металловедение.* — 6-е изд. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
6. *Чудина О. В.* Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: Моск. гос. автомобил.-дор. ин-т, 2003. — 46 с.
7. *The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys* / F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragneretal // Materials Sci. and Eng. — 2013. — № 560. — P. 481–491.
8. *Anandan S., Pityana L., Majumdar J. D.* Structure property correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC + Ni + NiCr // Ibid. — 2012. — Vol. 536. — P. 159–169.
9. *Лактин Ю. М., Леонтьева В. П.* *Материаловедение.* — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 528 с.
10. *Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюрин А. И.* Технологические процессы лазерной обработки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
11. *Калашиникова М. С.* Повышение служебных свойств поверхности конструкционных низкоуглеродистых сталей методом лазерного легирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург: Перм. гос. техн. ун-т, 2003. — 16 с.
12. *Технологические* лазеры: Справочник: В 2 т. / Г. А. Абилюсипов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь и др. / Под общ. ред. Г. А. Абилюсипова. — М.: Машиностроение, 1991. — Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация, 1991. — 432 с.
13. *Коваленко В. С., Головка Л. Ф., Черненко В. С.* Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — Киев: Техніка, 1990. — 192 с.
14. *Бураков В. А., Бровер Г. И., Буракова Н. М.* Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием // *Металловедение и терм. обработка мет.* — 1985. — № 11. — С. 2–6.
15. *Лихошва В. П., Шатрава А. П., Бондарь Л. А.* Лазерное легирование узлов трения // *Процессы литья.* — 2007. — № 3. — С. 35–37.
16. *Application of high power diode laser (HPDL) for alloying of X40CrMoV5-1 steel surface layer by tungsten carbides* / L. A. Dobrzanski, M. Bonek, E. Hajduczek, A. Klimpel // *J. of Mat. Proc. Tech.* — 2004. — № 155-156. — С. 1956–1963.
17. *Лазерні технології та комп'ютерне моделювання* / Під ред. Л. Ф. Головка та С. О. Лук'яненко. — Київ: Вістка, 2009. — 296 с.
18. *Zhong M., Liu W., Zhang H.* Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner // *Wear.* — 2006. — **260**, Issues 11-12. — P. 1349–1355.
19. *Microstructure, microhardness, composition, and corrosive properties of stainless steel 304 I. Laser surface alloying with silicon by beam-oscillating method* / Y. Isshiki, J. Shi, H. Nakai, M. Hashimoto // *Applied Physics A.* — 2000. — **70**, Issue 4. — P. 395–402.
20. *Majumdar J. D.* Development of wear resistant composite surface of mild steel by laser surface alloying with silicon and reactive melting // *Mater. Lett.* — 2008. — Vol. 62. — P. 4257–4259.
21. *Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layer in manufacturing* / J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. H. Childs // *CIRP Annals — Manufacturing Technology.* — 2007. — **56**, Issue 2. — P. 730–759.
22. *Игнатов М. Н., Калашиникова М. С., Белова С. А.* Влияние температурно-временных параметров на структуру и свойства поверхностного слоя конструкционных сталей после лазерного легирования // *Вестн. ПГТУ: Механика и технология материалов и конструкций.* — 2002. — № 5. — С. 154–159.
23. *Гаращук В. П.* *Основы фізики лазерів. Лазери для термічних технологій.* — Київ: ІЕЗ ім. С. О. Патона, 2005. — 244 с.
24. *Бирюков В. П.* Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения // *Вестн. машиностроения.* — 2008. — № 3. — С. 33–36.
25. *Майоров В. С., Матросов М. П.* Влияние поверхностно-активных веществ на гидродинамику лазерного легирования металлов // *Квантовая электроника.* — 1989. — **16**, № 4. — С. 806–810.
26. *Лазерные технологии* обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. — М.: Физматлит, 2009. — 664 с.
27. *Закономірності* формування азотованих шарів комбіновано лазерно-хіміко-термічною обробкою сталей / М. В. Кіндрачук, Н. В. Іщук, Л. Ф. Головка, М. В. Писаренко // *Металознавство та обробка металів.* — 2007. — № 1. — С. 31–35.
28. *Вплив* термоциклования на триботехнічні властивості боридних шарів, одержаних лазерним легуванням / М. В. Кіндрачук, О. І. Дудка, Ю. Г. Сухенко, Я. М. Михайлович // *Наук. пр. Українського держ. ун-ту харчових технологій.* — 2001. — № 10. — С. 74–75.
29. *A combined hot dip aluminizing/laser alloying treatment to produce iron-rich aluminide on alloy steel* / M. Emami, H. R. Shahverdi, S. Hayashi, M. J. Torck // *Metallurgical and Materials Transactions A.* — 2013. — № 2. — P. 1–9.
30. *Бирюков В. П.* Лазерное упрочнение и легирование // *Фотоника.* — 2011. — № 3. — С. 34–37.
31. *Leech P. W., Batchelor A. W., Stachowiak G. W.* Laser surface alloying of steel wire with chromium and zirconium // *J. of Materials Sci. Letters.* — 1992. — **11**, Issue 16. — P. 1121–1123.
32. *Тарасова Т. В.* Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и терм. обработка металлов.* — 2010. — № 6. — С. 54–58.
33. *Формування* покриттів триботехнічного призначення комбіновано, лазерно-хіміко-термічною обробкою / О. А. Корнієнко, М. С. Яхья, Н. В. Іщук, В. М. Писарен-



- ко // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. — Київ: НАУ, 2008. — Вип. 49, Т. 2. — С. 61–65.
34. *Thawari G., Sundararajan G., Joshi S. V.* Laser surface alloying of medium carbon steel with SiC<sub>(p)</sub> // *Thin Solid Films*. — 2003. — Vol. 423. — P. 41–53.
  35. *Dobrzanski L. A., Bonek M., Labisz K.* Effect of laser surface alloying on structure of a commercial tool steel // *J. of Microstructure and Materials Properties*. — 2013. — 8, Issue 1/2. — P. 27–37.
  36. *Лазько Г. В.* Особливості структуроутворення та шляхи підвищення властивостей бар'єрних шарів на корозійноотривких сталях, сформованих лазерним легуванням: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Донецьк: ДНТУ, 2009. — 21 с.
  37. *Коррозионная стойкость поверхностных слоев конструкционных сталей после лазерной обработки / М. С. Калашникова, С. А. Белова, Ю. А. Мазепина, М. Н. Игнатов // Физ. и химия обработки материалов*. — 2003. — № 2. — С. 34–39.
  38. *Haferkamp H., Bach F.-W., Gerken J.* Laserstrahl-legieren plasmagespritzter molybdanschichten in stahloberflächen zur erhöhung des verschleisswiderstandes // *Metall*. — 1995. — 49, Issue 7-8. — P. 516–522.
  39. *Жостик Ю. В.* Исследование ударного изнашивания разделительных штампов и повышение их стойкости лазерным легированием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Брянск: Брянская гос. инж.-технологич. академия, 1998. — 18 с.
  40. *Инютин В. П., Колесников Ю. В., Жостик Ю. В.* Влияние лазерного борирования на контактные деформации стали 45 при ударно-циклическом нагружении // *Электронная техника*. — Сер.6. Материалы. — 1986. — Вып. 4 (215). — С. 77–78.
  41. *New developments in surface technology: laser alloying using Mo/VC and Mn / F. Klocke, L. Rozsnoki, T. Celiker, W. Koenig // CIRP Annals — Manufacturing Technology*. — 1996. — 45, Issue 1. — P. 179–182.
  42. *Klocke F., Auer O., Hamers M.* Verschleibreduzierung bei schmiedewerkzeugen // *Maschinenmarkt*, Wuerzburg. — 1998. — 104, Issue 34. — P. 32–33.
  43. *Klocke F., Auer O., Hamers M.* Verschleibschutz von Wärmumformwerkzeugen // *VDI-Z Integrierte Produktion Special*. — 2002. — № 2. — P. 67–69.
  44. *Klocke F., Auer O., Hamers M.* Laser scan help protect tools // *Quelle diecasting world*. — 2000. — № 6. — P. 18–21.
  45. *Кастро В. А.* Разработка технологии лазерного термического упрочнения и легирования сталей для энергетического машиностроения с целью повышения эксплуатационного ресурса изделий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева, 2012. — 23 с.
  46. *Особенности формирования структуры сталей при лазерном термическом цикле / В. А. Кастро, Г. Н. Гаврилов, И. Брауэр, Е. С. Беляев // Заготовительные производства в машиностроении*. — 2011. — № 12. — С. 38–41.
  47. *Werkzeuge harten senkt die Kosten [Электронный ресурс]* — Режим доступа: [http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/alte%20jahresberichte/pflege.zv.fhg.de/german/publications/jahresber/jb1997/f\\_oberfl.html](http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/alte%20jahresberichte/pflege.zv.fhg.de/german/publications/jahresber/jb1997/f_oberfl.html).
  48. *Гаврилов Г. Н.* Разработка и освоение технологий поверхностного термического упрочнения и наплавки металлических материалов лазерным излучением: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2000. — 35 с.
  49. *Гаврилов Г. Н., Горшкова Т. А., Федосеев В. Б.* Влияние термохимических эффектов на процесс лазерного легирования // *Изв. Инж.-технолог. акад. Чувашской республики: объединен. науч. журн.* — 1997. — № 3-4. — С. 118–121.
  50. *Гаврилов Г. Н., Горшкова Т. А., Дубинский В. Н.* Исследование износостойкости стали 45 после лазерного легирования // *Там же*. — 1998. — № 1-2. — С. 122–125.

Поступила в редакцию 02.09.2013



## Международная научно-техническая конференция «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

16–18 июня 2014 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев) состоится Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы».

### Организаторы:

- Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
- Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ
- Международная ассоциация «Сварка»

На конференции предполагается обсудить актуальные вопросы разработки, производства и промышленного применения сварочных и наплавочных материалов, включая покрытые электроды, проволоки порошковые и сплошного сечения, ленты, флюсы, порошки. Планируется издание сборника по итогам работы конференции.

Для участия в работе конференции необходимо до 1 марта 2014 г. прислать заявку на адрес: [office@association-electrode.com](mailto:office@association-electrode.com) или [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua).

**Контакты:** 03680, г. Киев, ул. Горького, 54, Дирекция Ассоциации «Электрод».  
Тел.: +38 (044) 200-63-02, +38 (044) 200-82-77, +38 (044) 200-80-62.  
Факсы: +38 (044) 287-72-35, +38 (044) 200-82-77.



УДК 621.81:621.337

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПСЕВДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ

Ю. С. БОРИСОВ, Н. В. ВИГИЛЯНСКАЯ, И. А. ДЕМЬЯНОВ, А. П. ГРИЩЕНКО, А. П. МУРАШОВ  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено исследование влияния условий электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавного покрытия сталь-медь. Для определения степени влияния факторов напыления на характеристики покрытия использовали метод многофакторного планирования эксперимента. Анализ сплетов показал, что при всех исследуемых режимах напыления при столкновении с основой капли металла находятся в жидком состоянии. Получены регрессионные уравнения, связывающие технологические режимы напыления (скорость подачи проволок, напряжение, расход сжатого воздуха, дистанция напыления) с твердостью, содержанием в покрытии стальной и медной составляющих, оксидов и пор. Установлено, что в покрытиях, полученных распылением проволок стали и меди одинакового диаметра, содержание меди в общем объеме покрытия зависит от тепловложения в распыляемый материал и при 0,6...1,0 МДж/кг составляет около 35 об. %, а при 1,4...2,2 МДж/кг около 22 об. %. Вероятными причинами снижения содержания меди являются выгорание (испарение) и окисление меди в процессе распыления ввиду ее перегрева выше точки плавления. Наиболее действенным методом сокращения потерь меди за счет ее выгорания при напылении псевдосплавного покрытия сталь-медь является снижение степени нагрева напыляемых частиц и увеличение их скорости за счет увеличения расхода сжатого воздуха и снижения тепловложения в распыляемый материал. Наилучший комплекс структуры и свойств электродуговых псевдосплавных покрытий сталь-медь по показателям сохранения соотношения компонентов (1:1), пористости (8 об. %), степени окисления (21 об. %) и твердости (2700 МПа) получили в случае напыления при тепловложении в проволоку 1,0 МДж/кг и расходе сжатого воздуха 126 м<sup>3</sup>/ч. Библиогр. 22, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* электродуговое напыление, псевдосплавные покрытия, микроструктура, пористость, окисление, микротвердость

Процесс электродугового напыления характеризуется большим количеством факторов, оказывающих влияние на эксплуатационные свойства покрытий. Для управления свойствами получаемых покрытий необходимо проводить исследование влияния этих факторов на процесс образования покрытий.

Механические свойства покрытий, полученных электродуговым напылением, связаны с их строением и находятся в зависимости от режимов напыления, которые изменяют микроструктуру покрытий (содержание в покрытии оксидов и пор).

Оксиды в покрытии играют двоякую роль. С одной стороны они в значительной мере повышают износостойкость покрытия, так как в основном имеют более высокую твердость, чем исходные чистые металлы. В то же время имеется некоторое критическое количество оксидов, превышение которого скачкообразно снижает работоспособность покрытия под воздействием внешних нагрузок, так как увеличивается его хрупкость [1]. Наличие пористости в покрытиях снижает износостойкость при сухом трении [2], однако поры играют положительную роль в антифрикционных покрытиях, обеспечивая благоприятные условия

для сохранения в процессе трения масляной пленки [3].

Большинство исследователей сходятся во мнении, что повышение давления распыляющего газа способствует снижению пористости покрытий [4]. При увеличении давления распыляющего газа увеличивается дисперсность распыляемого материала (алюминия, стали, меди) [5, 6] и скорость движения частиц [7], что ведет к формированию более плотной однородной структуры покрытий. Изменение скорости подачи проволок, напряжения на электродах и дистанции напыления незначительно влияет на размер распыляемых частиц (алюминий, сталь-медь) [5]. Уменьшение напряжения горения дуги приводит к некоторому смещению размера напыляемых частиц в область более мелких фракций при распылении проволок стали, меди или алюминия [6, 8, 9]. Увеличение тока дуги со 150 до 200 А ведет к уменьшению пористости покрытия на 1,5...2,0 % [10].

Однако с увеличением давления распыляющего газа увеличивается содержание оксидов в покрытии, так как с уменьшением размера напыляемых частиц происходит более интенсивное их взаимодействие с кислородом [11]. При увеличении диаметра час-



тиц от 10 до 237 мкм степень окисления капель уменьшается примерно на 30 % [12].

С увеличением дистанции напыления от 25 до 300 мм содержание оксидов в покрытии увеличивается с 10 до 40 % за счет увеличения времени взаимодействия частиц с кислородом в струе [3].

При использовании электродуговых покрытий в качестве износостойких материалов важным свойством покрытий является твердость, которая определяется условиями формирования слоя при распылении металла. При увеличении давления распыляющего газа твердость покрытия увеличивается ввиду формирования более плотного покрытия [13]. Покрытия из проволоки с низким содержанием углерода приобретают твердость вследствие большого количества оксидов [2]. При применении высокоуглеродистых проволок твердость покрытия возрастает с увеличением расстояния до 100 мм, а затем при дальнейшем увеличении расстояния твердость уменьшается вследствие увеличения содержания пор в покрытиях. При повышении давления сжатого воздуха с 3 до 7 атм. при применении высокоуглеродистых проволок твердость покрытий увеличивается с *HV* 193 до *HV* 207. С увеличением подачи проволоки, а следовательно силы тока, твердость понижается.

При электродуговом напылении процесс плавления и отрыва капель с проволок анода и катода происходит неодинаково [5, 14]. При использовании разнородных проволок в случае напыления псевдосплавных покрытий на процесс несимметричного расплавления, формирования и отрыва капель также оказывает влияние разница в скоростях плавления проволок (ввиду разницы температур плавления этих материалов). Это ведет к формированию неравномерной микроструктуры. В работе [15] показана неравномерность распределения компонентов покрытия по пятну напыления при распылении проволок стали и меди.

При напылении псевдосплавных покрытий равномерность распределения компонентов является важной характеристикой.

Целью настоящей работы является изучение влияния рабочих параметров электродугового напыления на микроструктуру (пористость, степень окисления, однородность распределения компонентов) и твердость псевдосплавных покрытий сталь–медь.

**Методика проведения эксперимента.** При исследовании процесса формирования псевдосплавных покрытий, получаемых одновременным распылением разнородных проволок, в качестве материалов использовали проволоки диаметром 2 мм меди марки М1 и стальную Св08А. Нанесение покрытий проводили электродуговым металлизатором ЭМ-14М с источником питания ВДУ-506. Для установления характера взаимосвязи между условиями распыления проволок и структурой псевдосплавных покрытий использовали метод математического планирования эксперимента [16]. В качестве изменяемых факторов выбрали следующие параметры: скорость подачи проволок  $w_{пр}$ , м/ч; напряжение на электродах дуги  $U$ , В; расход сжатого воздуха  $V_r$ , м<sup>3</sup>/ч (давление сжатого воздуха, атм); дистанция напыления  $H$ , м. Выбор основывался на том, что эти факторы оказывают наиболее существенное влияние на структуру и качество покрытий [2, 5]. Для четырехфакторного эксперимента использовали полуреплику  $2^{4-1}$ . Условия проведения эксперимента сведены в матрицу планирования (табл. 1). Для анализа процесса напыления проволок в табл. 1 введены величины мощности дуги  $P$ , комплексы параметров, характеризующие удельный расход энергии на нагрев газа  $IU/V_r$  и проволоки  $IU/G_{пр}$ , которые позволяют определить уровень тепловложения в напыляемый материал и газовую струю. Получаемые численные величины показателей  $IU/V_r$  и  $IU/G_{пр}$  относятся к предельным

Таблица 1. Матрица математического планирования эксперимента\*

Номер опыта	Параметры напыления				Мощность $P$ , кВт	$IU/V_r$ , МДж/м <sup>3</sup> газа	Расход проволок $G_{пр}$ , кг/ч	$IU/G_{пр}$ , МДж/кг проволоки	$d_{част.}$ , мкм [6]	$S$ , м <sup>2</sup> /кг	$H/V_r$ , ч/м <sup>2</sup> ·10 <sup>-6</sup>
	$w_{пр}$ , м/ч	$U$ , В	$V_r$ , м <sup>3</sup> /ч (давление, атм.)	$H$ , м							
1	300	48	126 (7)	0,20	9,8	0,28	15,8	2,2	37	19,4	15,9
2	300	48	108 (6)	0,06	9,8	0,33	15,8	2,2	42	17,1	5,6
3	300	22	126 (7)	0,06	4,4	0,13	15,8	1,0	40	17,9	4,8
4	300	22	108 (6)	0,20	4,4	0,15	15,8	1,0	52	13,8	18,5
5	180	48	126 (7)	0,06	3,8	0,11	9,5	1,4	46	15,6	4,8
6	180	48	108 (6)	0,20	3,8	0,13	9,5	1,4	52	13,8	18,5
7	180	22	126 (7)	0,20	1,7	0,05	9,5	0,6	45	15,9	15,9
8	180	22	108 (6)	0,06	1,7	0,06	9,5	0,6	54	13,3	5,6

\* Количество теплоты, необходимое для расплавления проволок, 0,49 МДж/кг.



значениям использования энергии электрической дуги. В случае  $IU/V_r$  предполагается, что она полностью затрачивается на нагрев распыляющего газа, а в случае  $IU/G_{пр}$  — на нагрев распыляемой проволоки. Данные показатели предназначены для качественной оценки условий процесса электродугового напыления. Для оценки протекания процесса окисления частиц напыляемого материала в табл. 1 представлены расчет их удельной реакционной поверхности  $S$  и показатель времени их пребывания в струе  $H/V_r$ .

Граничные условия факторов выбраны из анализа предыдущих экспериментов и опыта электродугового напыления покрытий из проволочных материалов [17, 18]. Значение тока было связано с изменением скорости подачи проволок и составляло 80 А при скорости подачи 180 м/ч и 200 А при скорости 300 м/ч. Кроме указанных изменяемых факторов постоянными оставались такие факторы, как угол напыления — 90°, угол между электродами — 30°.

Для исследования состояния частиц в момент соударения их с основой проводили сплет-тест по методике, описанной в работе [13]. Напыление сплетов проводили на пластины из полированной нержавеющей стали размером 50×30×1 мм посредством перемещения металлатора. Для определения скорости частиц в процессе электродугового распыления проволочных материалов использовали измеритель скоростей светящихся объектов ИССО-1 [19].

Для исследования микроструктуры покрытия напыляли на образцы из Ст3 размером 20×15×3 мм. Перед напылением образцы подвергались пескоструйной обработке. Толщина покрытия составляла 500...700 мкм.

Все эксперименты проводили на режимах, соответствующих плану эксперимента. Микроструктуру покрытий и внешний вид сплетов исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot-32».

Определение содержания компонентов в покрытии, оксидов и пор проводили с помощью программы обработки изображений «Atlas». Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3. Замеры проводили по всему сечению покрытий.

**Результаты эксперимента.** Анализ результатов проводили с учетом показателей процесса тепловложения в газ и проволоку и условий взаимодействия частиц с газовой средой (табл. 2).

*Исследование формы частиц расплава после соударения с поверхностью (сплет-тест).* Анализ сплетов, полученных одновременным распылением проволок меди и стали, показал, что при всех опытах частицы имеют звездообразную форму (рис. 1).

Такой тип сплетов получается из частиц, находящихся в момент соударения с основой в жидком состоянии, т. е. при полете на дистанции напыления частицы не затвердевают, что объясняется кратковременностью полета [20]. Измерение скорости частиц показало, что в момент соударения частиц с основой их скорость составляет около 100 м/с. При дистанции напыления 0,06...0,2 м время пребывания частиц в струе равно 0,6...2,0 мс.

Цвет медной составляющей на сплетах, полученных при опытах № 1 и 2, свидетельствует о ее перегреве, что, по-видимому, вызвано сочетанием максимальных тепловложений в струю и проволоку (табл. 2, опыты № 1 и 2), приводящему к разогреву металла до более высокой температуры. Разбрызгивание частиц, наблюдаемое на сплетах № 1, 2, 5, 6, свидетельствует о их перегреве, связанным с этими же причинами.

*Исследование микроструктуры псевдосплавных покрытий сталь-медь.* Анализ структуры покрытий, полученных одновременным распыле-

**Таблица 2. Показатели процесса тепловложения в газ и проволоку и условия взаимодействия частиц с газовой средой**

Номер опыта	Тепловложение в струю $IU/V_r$ , МДж/м <sup>3</sup>			Тепловложение в проволоку $IU/G_{пр}$ , МДж/кг				Размер удельной реакционной поверхности частиц $S$ , м <sup>2</sup> /кг			Показатель времени пребывания частиц в струе $H/V_r$ , ч/м <sup>2</sup> ·10 <sup>-6</sup>	
	0,28...0,33	0,11...0,13	0,05...0,06	2,2	1,4	1,0	0,6	17...19	15...16	13...14	16...19	5...6
1	×			×				×			×	
2	×			×				×				×
3		×				×		×				×
4		×				×				×	×	
5		×			×				×			×
6		×			×					×	×	
7			×				×		×		×	
8			×				×			×		×

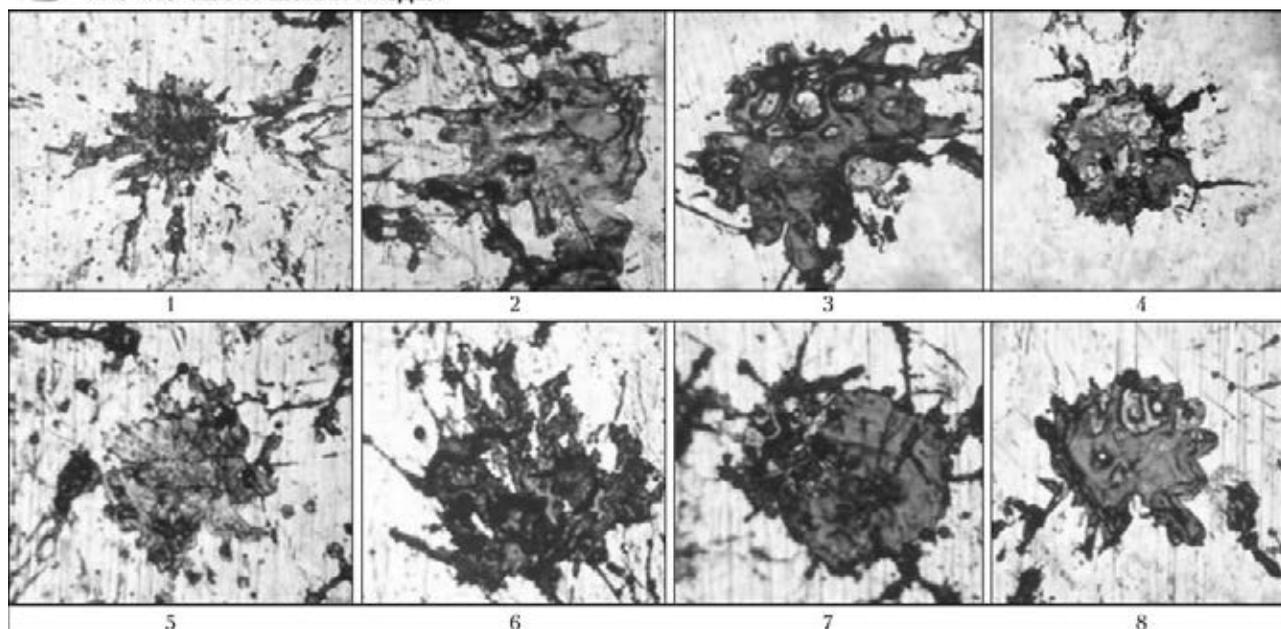


Рис. 1. Сплеты частиц, полученных одновременным распылением проволок меди и стали при использовании условий напыления согласно матрице табл. 1 (1–8 — номера опытов)

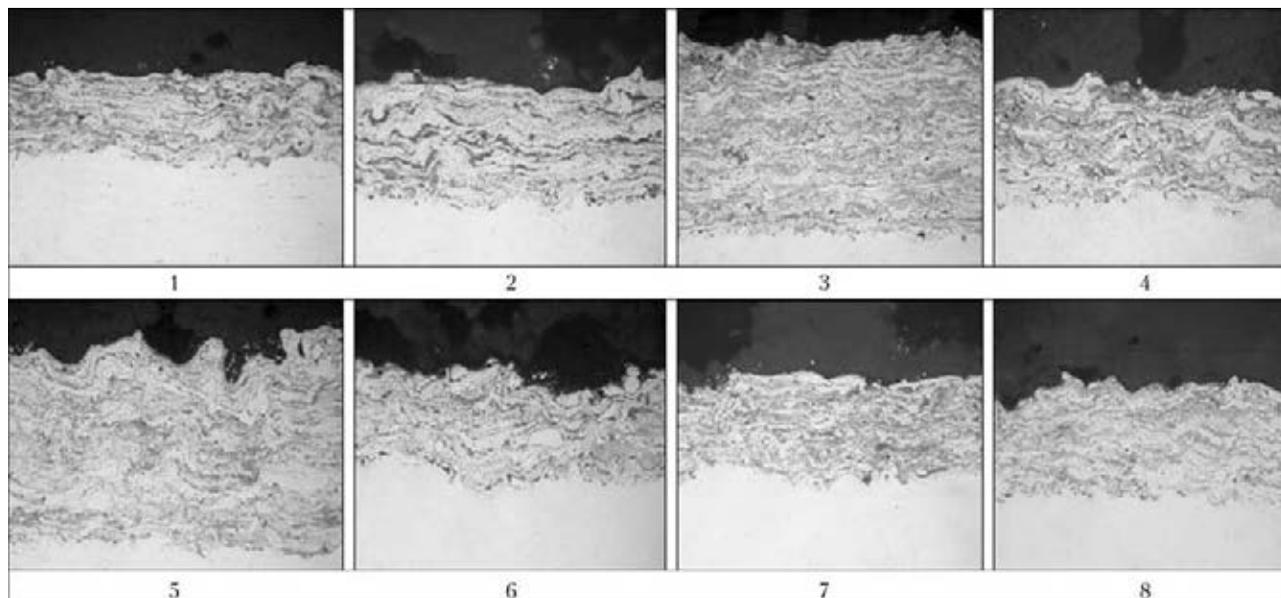


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 200$ ) покрытий сталь–медь (1–8 — номера опытов)

нием проволок стали и меди, показал, что в данном диапазоне режимов напыления все покрытия плотные с выраженной ламелярностью структуры (рис.2). Такой вид структур характерен для покрытий, сформированных из частиц, находящихся в момент соударения с основой в жидком состоянии и имеющих достаточно большую скорость, что согласовывается с результатами исследования сплетов.

В табл. 3 приведено содержание компонентов в покрытии, степень окисления и пористость.

Анализ содержания компонентов в покрытиях показал, что в результате напыления происходит изменение в относительном содержании в покрытиях стали и меди. Содержание меди в распыляемом материале при равных диаметрах рас-

пыляемых проволок (2 мм) составляет 50 об. %. Так, при высоких значениях величин тепловложения в проволоку (табл. 2, опыты № 1, 2, 5, 6), что соответствует значениям 2,2 и 1,4 МДж/кг, процентное содержание меди в суммарном содержании медной и стальной составляющих составляет 36, 33, 30, 29 об. % соответственно. При снижении этого тепловложения до 1,0 МДж/кг (опыты № 3, 4) и 0,6 МДж/кг (опыты № 7, 8) процентное содержание меди в суммарном содержании медной и стальной составляющих покрытия повышается до 51, 48, 47, 48 об. % соответственно.

Данное явление очевидно связано с тем, что в процессе напыления температура расплавленных частиц может значительно превышать тем-



пературу плавления меди [5] и достигать температуры кипения 2800 К. Так как температуры кипения и упругости паров меди и железа различны (давление пара меди (113 Па) по сравнению с железом (13,3 Па) более высокое [21]), повышенный расход энергии на нагрев проволок (табл. 2, опыты № 1, 2, 5, 6) приводит к более интенсивному нагреву медной проволоки при расплавлении и, очевидно, к ее частичному испарению в процессе напыления. Условия, обусловленные свойствами электрической дуги (электродинамические силы, действующие в области дугового разряда), также способствуют переходу частиц меди в газовую фазу [21, 22].

Другой возможной причиной снижения содержания медной составляющей может являться более интенсивное по сравнению с железом окисление меди в процессе напыления.

Увеличение расхода сжатого воздуха и скорости подачи проволоки ведет к сохранению содержания меди в покрытии. Это может объясняться тем, что увеличение расхода сжатого воздуха и, как следствие, повышение скорости струи увеличивает скорость частиц и снижает их температуру, что понижает интенсивность процесса испарения меди. Из уравнения регрессии, отражающего влияние параметров процесса на содержание меди в покрытиях, следует также, что наиболее действенным методом сохранения соотношения содержания компонентов в покрытии относительно исходного является увеличение расхода сжатого воздуха и снижение напряжения для уменьшения выгорания медной составляющей. Степень влияния параметров напыления на содержание меди в покрытии (рис. 3), представлена следующим уравнением:  $\%Cu = 49,09 + 0,03W - 0,6U + 1,5V + 0,004H$ . Изменение дистанции напыления в пределах 0,06...0,2 м на содержание компонентов в покрытии существенного влияния не оказывает.

Максимальное содержание оксидов обнаружено в покрытиях, напыленных на режимах с максимальным расходом сжатого воздуха и максимальной дистанцией напыления (табл. 3, опыты № 1, 7). Это связано с тем, что повышение расхода сжатого воздуха ведет к уменьшению диаметра распыляемых частиц при диспергировании проволок [6], что ведет к увеличению размера площади развития процесса окисления. Увеличение дистанции напыления ведет в свою очередь к увеличению времени пребывания частиц в струе и развитию процесса взаимодействия частиц с кислородом. Степень влияния факторов напыления на содержание оксидов в покрытиях (рис. 4) пред-

Таблица 3. Содержание компонентов, степень окисления и пористость псевдосплавных покрытий сталь-медь

Но-мер опыта	Содержание меди в покрытии, об. %	Содержание стали в покрытии, об. %	Содержание оксидов, об. %	Пористость, об. %	Содержание меди в суммарном содержании металлических составляющих, об. %
1	24	42	27	7	36
2	23	47	20	10	33
3	37	36	21	8	51
4	33	36	25	6	48
5	21	49	25	5	30
6	19	46	22	13	29
7	31	35	26	8	47
8	35	38	21	6	48

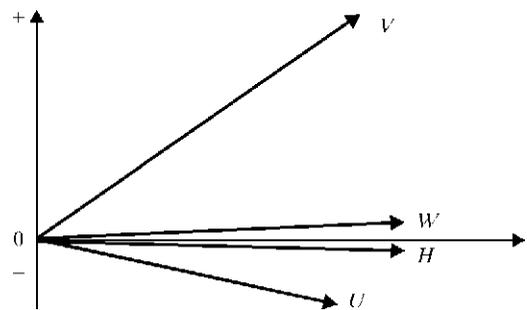


Рис. 3. Степень влияния факторов напыления на содержание меди в покрытиях

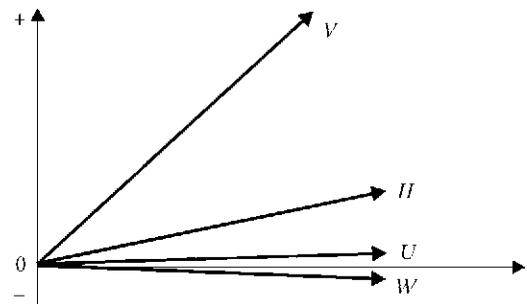


Рис. 4. Степень влияния факторов напыления на степень окисления покрытий

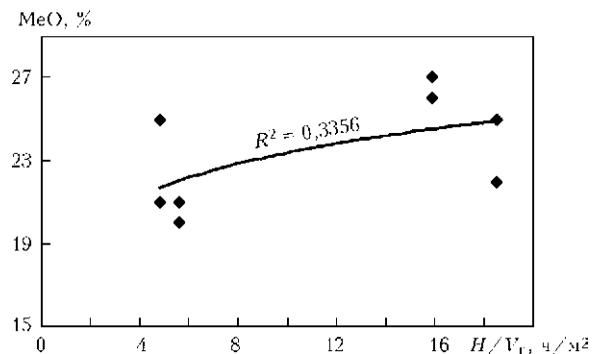


Рис. 5. Зависимость степени окисления покрытия от показателя времени пребывания частиц в струе

ставлена уравнением  $\%MeO = 2,44 - 0,002W + 0,01U + 2,75V + 0,02H$ .

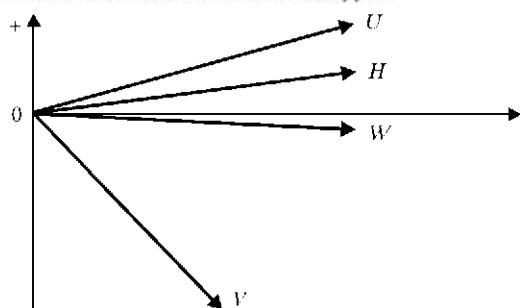


Рис. 6. Степень влияния факторов напыления на пористость покрытий

На рис. 5 представлена зависимость содержания оксидов в покрытии от показателя времени пребывания частиц в струе ( $H/V_r$ ).

Результаты исследования пористости покрытий показали, что она не превышает 13 %. Как видно из уравнения регрессии, на величину пористости в первую очередь оказывает влияние расход сжатого воздуха, увеличение которого ведет к увеличению скорости полета частиц, снижению размера распыляемых капель и, следовательно, к формированию более плотного покрытия. Степень влияния факторов напыления на величину пористости покрытий (рис. 6) описывается уравнением:  $\%П = 16,03 - 0,002W + 0,07U - 1,75V + 0,01H$ .

На пористость покрытий оказывает также влияние отношение плотности твердого материала к плотности расплава ( $\rho_{ТВ}/\rho_{Ж} = 8,93/8,03 = 1,11$  для меди и  $\rho_{ТВ}/\rho_{Ж} = 7,87/7,02 = 1,12$  для железа). Так как плотность расплава материала покрытия меньше его плотности в твердом состоянии, при затвердевании расплавленных частиц их объем уменьшается, что и ведет к образованию пор.

На рис. 7 приведена гистограмма зависимости микротвердости псевдосплавного покрытия сталь-медь от режима напыления.

Замеры твердости в количестве 50 измерений проводили по всему сечению покрытия. Зависимости микротвердости от положения точек заме-

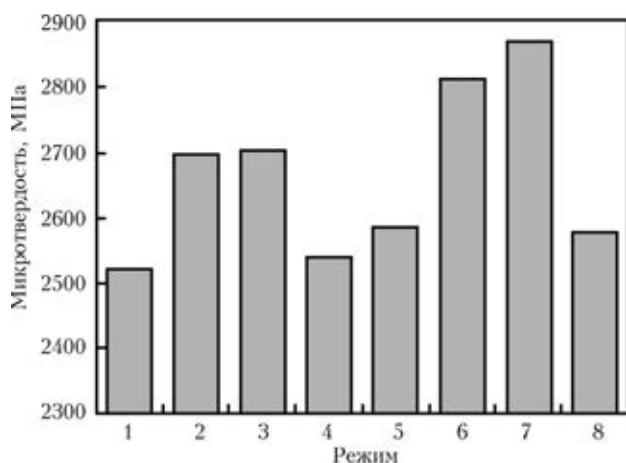


Рис. 7. Зависимость микротвердости покрытий сталь-медь от режима распыления

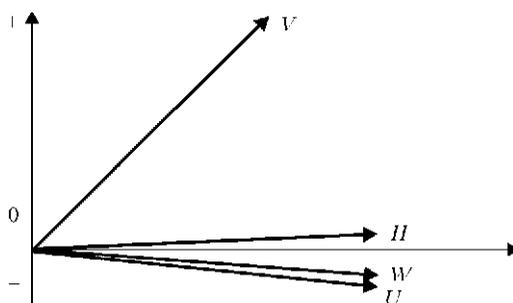


Рис. 8. Степень влияния факторов напыления на микротвердость покрытий сталь-медь

ров не обнаружено. Микротвердость покрытий, полученных при различных режимах напыления, находится в пределах 2500...2900 МПа.

Полученные уравнения регрессии, связывающие параметры напыления с твердостью покрытия, показывают, что твердость покрытия повышается с увеличением расхода сжатого воздуха и дистанцией напыления. Это вызвано ростом степени окисления составляющих покрытия при увеличении этих параметров и упрочнением материала покрытия включениями оксидов. Увеличение скорости подачи проволок и напряжения в равной степени ведет к уменьшению твердости покрытия за счет увеличения тепловложения в напыляемые материалы, что может приводить к их разупрочнению. Степень влияния факторов напыления на микротвердость покрытий сталь-медь (рис. 8) представлена уравнением регрессии:  $HV = 2680 - 0,8W - 0,77U + 12V + 0,324H$ .

Наилучший комплекс структуры и свойств электродуговых псевдосплавных покрытий сталь-медь по показателям сохранения соотношения компонентов (37 об. % Cu, 36 об. % Fe), пористости (8 об. %), степени окисления (21 об. %) и твердости (2700 МПа) был получен в случае напыления при тепловложении в проволоку 1,0 МДж/кг и расходе сжатого воздуха 126 м<sup>3</sup>/ч (табл. 1, опыт № 3) — т. е. при комбинации средней степени вклада энергии дуги в нагрев распыляющего газа (воздуха), ограниченной интенсивности нагрева расплава проволок и повышенной скорости продуктов распыления высокой дисперсности, что обеспечивает получение покрытий с низкой пористостью.

## Выводы

1. Проведено исследование процесса напыления псевдосплавного покрытия на примере псевдосплавов сталь-медь с применением метода математического планирования эксперимента. Анализ сплотов, полученных при используемом диапазоне режимов напыления, показал, что частицы в момент соударения с основой находятся в расплавленном состоянии и характеризуются высокой скоростью (около 100 м/с). Структура покрытий имеет ла-



лярную структуру и состоит из компонентов меди и стали с оксидными включениями.

2. Установлено, что при электродуговом напылении псевдосплавных покрытий из проволок меди и стали изменение тепловложения в распыляемый материал приводит к изменению соотношения содержания медной и стальной составляющих в покрытии. При напылении с тепловложением в проволоку 1,4...2,2 МДж/кг относительное содержание меди по отношению к стали составляет около 30 об. %, а при 0,6...1,0 МДж/кг составляет около 50 об. %. Вероятными причинами снижения содержания меди являются выгорание (испарение) и окисление меди в процессе распыления ввиду ее перегрева выше точки плавления. Наиболее действенным методом снижения потерь меди для получения равномерного содержания компонентов в псевдосплавном покрытии сталь-медь является увеличение расхода сжатого воздуха до 126 м<sup>3</sup>/ч и снижение тепловложения в напыляемый материал до 0,6...1,0 МДж/кг для уменьшения выгорания медной составляющей.

3. Максимальное содержание оксидов 26...27 % обнаружено в покрытиях при напылении с расходом сжатого воздуха 126 м<sup>3</sup>/ч и дистанцией напыления 0,2 м. Это связано с увеличением дисперсности распыляемых материалов и увеличением времени взаимодействия частиц с кислородом. На величину пористости в первую очередь оказывает влияние расход сжатого воздуха, увеличение которого со 108 до 126 м<sup>3</sup>/ч ведет к снижению размера распыляемых капель и следовательно к формированию более плотного покрытия.

4. Микротвердость полученных покрытий находится в пределах 2500...2900 МПа. Полученные уравнения регрессии, связывающие параметры напыления с твердостью покрытия, показывают, что твердость покрытия повышается с увеличением расхода сжатого воздуха со 108 до 126 м<sup>3</sup>/ч и дистанции напыления с 0,06 до 0,2 м. Это вызвано ростом степени окисления составляющих покрытия.

5. Основным фактором напыления, влияющим на характеристики псевдосплавного покрытия сталь-медь, является расход сжатого воздуха, увеличение которого ведет к сохранению содержания компонентов в покрытии относительно исходного, уменьшению пористости и увеличению твердости.

1. Коробов Ю. С. Совершенствование технологии электродуговой металлизации на основе моделирования взаимодействия металла с газами и исследования свойств покрытий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Ур. гос. техн. ун-т., 2006. — 31 с.
2. Вадивасов Д. Г. Восстановление деталей металлизацией. — Саратовское книжное изд-во, 1956. — 279 с.

3. Красниченко Л. В. Современная технология металлизации распылением. — М.: Трудрезервиздат, 1958. — 94 с.
4. Брусило Ю. В. Особенности покрытий, полученных электрометаллизацией с последующим электроконтактным припеканием // Вісник Нац. транспортного ун-ту: В 2-х ч. Ч.1. — К.: НТУ, 2009. — Вип. 19. — С. 75–82.
5. Particle size distribution in a wire-arc spraying system / A. Pourmoussa, J. Mostaghimi, A. Abedini, S. Chandra // J. of Thermal Spray Technology. — 2005. — V. 14. — P. 502–510.
6. Исследование диспергирования разнородных проволочных материалов в процессе электродугового напыления / Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов и др. // Автомат. сварка. — 2013. — № 2. — С. 25–31.
7. Newbery A. P., Grant P. S., Neiser R. A. The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 195, Issue 1. — P. 91–101.
8. Анализ методов управления параметрами напыляемых частиц при электродуговой металлизации / В. А. Агеев, В. Е. Белашенко, И. Э. Фельдман, А. В. Черноиванов // Свароч. пр-во. — 1989. — № 12. — С. 30–32.
9. Newbery A. P., Grant P. S. Large arc voltage fluctuations and droplet formation in electric arc spraying // Powder Met. — 2003. — 46, № 3. — P. 229–235.
10. Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying / H. L. Liao, Y. L. Zhu, R. Bolo et al. // Surface and Coatings Technology. — 2005. — V. 200, Issue 7. — P. 2123–2130.
11. Бороненков В. Н., Коробов Ю. С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. — 265 с.
12. Коробов Ю. С., Бороненков В. Н. Кинетика взаимодействия напыляемого металла с кислородом при электродуговой металлизации // Свароч. пр-во. — 2003. — № 7. — С. 30–36.
13. Planche M. P., Liao H., Coddet C. Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions // Surface and Coatings Technology. — 2004. — V. 182, Issues 2-3. — P. 215–226.
14. Hussary N. A., Heberlein J. V. R. Atomization and particle-jet interactions in the wire-arc spraying process // J. of Thermal Spray Technology. — 2001. — V. 10, Issue 4. — P. 604–610.
15. Zhu Y. L., Liao H. L., Coddet C., Xu B. S. Characterization via image analysis of cross-over trajectories and inhomogeneity in twin wire arc spraying. // Surface and Coatings Technology. — 2003. — V. 162, Issues 2-3. — P. 301–308.
16. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. — М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. — 304 с.
17. Катц Н. В., Антошин Е. В., Вадивасов Д. Г. Металлизация распылением. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.
18. Троицкий А. Ф. Основы металлизации распылением. — Ташкент: Госиздат УзССР, 1960. — 184 с.
19. Разработка измерителя скорости светящихся объектов ИССО-1: (Отчет по научно-исследовательской работе) / Ин-т физики Академии наук БССР; науч. руководитель В. Д. Шиманович; № ГР Б046721; Инв. № 1911. — Минск, 1979. — 38 с.
20. Кузнецов В. Д., Паценко В. Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів. Навчальний посібник. — Київ: НМЦ ВО, 1999. — 179 с.
21. [http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/yeresko/dis/dis\(ru\).htm](http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/yeresko/dis/dis(ru).htm). Анализ технологии удаления меди испарением из расплавленного металла под действием электрической дуги.
22. Медь в стали и проблемы ее удаления / И. Н. Зигало, В. И. Баптизманский, Ю. Ф. Вяткин и др. // Сталь. — 1991. — № 7. — С. 18–22.

Поступила в редакцию 19.06.2013



## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ Р6М5 В УСЛОВИЯХ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Л. И. МАРКАШОВА, Ю. Н. ТЮРИН, О. В. КОЛИСНИЧЕНКО, М. Л. ВАЛЕВИЧ, Д. Г. БОГАЧЕВ  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Работа посвящена исследованию структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях быстрорежущей стали Р6М5 после упрочняющей импульсно-плазменной поверхностной обработки на различных режимах и влияния параметров формирующихся структур на эксплуатационные свойства инструмента. В результате комплексных исследований и расчетно-аналитического прогнозирования свойств прочности, коэффициента вязкости разрушения и трещиностойкости поверхностей, упрочненных на различных технологических режимах, установлено, что оптимальные свойства поверхностных слоев обеспечиваются при рекомендуемых режимах импульсно-плазменной поверхностной обработки, повышающих общий уровень прочности на 25 % по сравнению с основным металлом за счет измельчения зеренной структуры (в 1,5...2 раза), увеличения вклада субструктурного, зеренного, дислокационного и дисперсионного механизмов упрочнения. При этом уровень локальных внутренних напряжений в обработанном слое составляет ~0,018...0,44 от теоретической прочности материала, что не представляет опасности трещинообразования из-за отсутствия резких градиентов по внутренним напряжениям и равномерно повышенной плотности дислокаций ( $10^{11}...2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) по сравнению с основным металлом. Показано, что при существенном упрочнении обработанных слоев быстрорежущей стали значение коэффициента вязкости разрушения на 15 % выше по сравнению с основным металлом. Таким образом, применение рекомендуемых режимов импульсно-плазменной поверхностной обработки приводит к модифицированию структурно-фазового состояния поверхностного слоя и повышению его механических свойств. Библиогр. 31, рис. 9.

*Ключевые слова:* импульсно-плазменная обработка, поверхность, быстрорежущая сталь Р6М5, световая микроскопия, электронная микроскопия, аналитическая оценка, прочность, вязкость разрушения, трещиностойкость

Инструментальная сталь Р6М5 предназначена для работы в условиях высоких контактных нагрузок и температур, а это, как правило, металлообрабатывающий инструмент, где наиболее интенсивному износу подвергается поверхностный рабочий слой изделий. С учетом сложных эксплуатационных условий представляет интерес улучшение комплекса физико-механических свойств этого слоя путем перекристаллизации и модифицирования структуры. Предварительные исследования [1–4] показали, что наиболее существенные изменения структуры поверхностного слоя наблюдаются при использовании концентрированных источников нагрева: лазер, электронный луч, плазма и др. С этой же целью используют и разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона технологию импульсно-плазменной обработки (ИПО) [5–7].

Технология ИПО сталей основывается на воздействии концентрированных потоков плазмы в импульсном режиме на поверхность материалов, что приводит к повышению твердости, измельчению зерна, фрагментации структуры и устранению скоплений крупных карбидных частиц, а также формированию в обработанном слое мартенсита с избыточным содержанием углерода (из-

за частичного растворения карбидов) и легирующих элементов [7–18]. Однако в настоящее время информация о влиянии различных технологических параметров ИПО на структурно-фазовые преобразования, а структурных параметров — на эксплуатационные характеристики (свойства прочности, пластичность и трещиностойкость) обработанных изделий ограничена.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование структуры и расчетно-аналитическое прогнозирование свойств поверхностных слоев образцов из стали Р6М5 после ИПО на различных режимах.

**Материалы и методики исследований.** Предварительно образцы из стали Р6М5 (ГОСТ 19265–73) подвергли стандартной термической обработке — закалке ( $T_3 = 1200...1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и отпуску ( $T_{\text{отп}} = 540...560 \text{ }^\circ\text{C}$ ). ИПО (длительность воздействия  $t_{\text{имп}} \sim 0,5 \text{ мс}$ ) проводили на следующих режимах: I — прямое действие импульсного электрического разряда (дистанция  $H = 60 \text{ мм}$ , тепловой поток  $q \sim 0,7 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ ) и II — косвенное действие электрического разряда ( $H = 30 \text{ мм}$ ,  $q \sim 0,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ ).



Исследования структурно-фазового состояния поверхностей образцов, обработанных ИПО, проведены с использованием комплексного методического подхода, включающего оптическую металлографию (Versamet-2, фирмы «Union», Япония), растровую электронную микроскопию (SEM-515, фирмы «Philips», Голландия) и просвечивающую микродифракционную электронную микроскопию (JEM-200 CX фирмы «JEOL», Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ. Полученные экспериментальные данные позволили выполнить расчетно-аналитическую оценку конкретного (дифференцированного) вклада отдельных структурных параметров (фазового состава, величины зерна, субзерна, плотности дислокаций и т. п.) в изменение общих (интегральных) значений механических характеристик — прочности  $\sigma_T$ , коэффициента вязкости разрушения (коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ ) и трещиностойкости ( $\tau_{л.вн}/\tau_{теор.}$ ).

Для расчета интегральных значений предела текучести  $\Sigma\sigma_T$  стали Р6М5 после ИПО на различных режимах использовали зависимости Холла–Петча, Зегера, Орована и др. [19–28], позволяющие сделать оценку дифференцированного вклада  $\Delta\sigma$  конкретных структурно-фазовых параметров в  $\Sigma\sigma_T$ .

Вязкость разрушения материала обработанного слоя определяли по зависимости  $K_{Ic} = (2E\sigma_T\delta_k)^{1/2}$  [29], где  $E$  — модуль Юнга;  $\sigma_T$  — расчетное упрочнение, МПа;  $\delta_k$  — критическое раскрытие трещины, равное среднему размеру субзерен, мкм.

Уровень локальных внутренних напряжений  $\tau_{л.вн}$  — потенциальных источников зарождения и распространения трещин в упрочненном слое рассчитывали, используя зависимость:  $\tau_{л.вн} = Gbh\rho/[\pi(1-\nu)]$  [30, 31], где  $G$  — модуль сдвига, МПа;  $b$  — вектор Бюргерса;  $h$  — толщина фольги, равная  $2 \cdot 10^{-5}$  см;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — плотность дислокаций,  $см^{-2}$ .

**Результаты исследований.** Экспериментально установлено, что структура основного металла (величина зерна  $D_3$ , мкм; объемная доля структурных составляющих  $V_d$ , %) на глубине  $\delta > 100$  мкм от обработанных поверхностей (рис. 1, слой 4, 7) состоит из мелкоугольчатого мартенсита ( $D_3 \sim 2,5...10$  мкм,  $V_d = 70$  %), остаточного аустенита ( $D_3 \sim 2,5...10$  мкм,  $V_d = 20$  %) и карбидов ( $D_3 \sim 0,5...20$  мкм,  $V_d = 10$  %) (рис. 2). Интегральная микротвердость стали  $HV_{0,05} \sim 7010$  МПа (рис. 3). Объемная доля упрочняющих карбидных частиц, расположенных в объемах зерен,  $V_d = 8$  %. Общая доля карбидов в материале — 18 %.

После ИПО (режим I) на поверхности образцов формируется оплавленный слой 1 ( $\delta \leq 5$  мкм) (рис. 1, а). Ниже — слой 2 ( $\delta \leq 40$  мкм), где

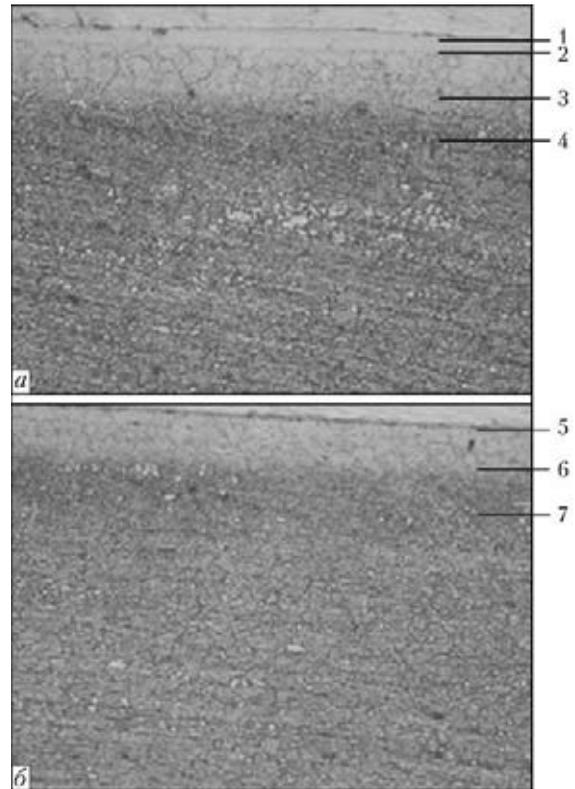


Рис. 1. Микроструктуры образцов из стали Р6М5 после ИПО на режимах I (а) и II (б) (изменения по глубине от отработанной поверхности до основного металла),  $\times 500$ : 1 — оплавленный; 2, 5 — структурированный; 3, 6 — переходной слой; 4, 7 — основной металл

происходит укрупнение в 2...2,5 раза аустенитно-мартенситных структурных составляющих ( $D_3 \sim 5...25$  мкм) и общее снижение на 20 % интегральной микротвердости ( $HV_{0,05} \leq 6200$  МПа) (рис. 2, 3). При этом именно в оплавленном слое 1 ( $\delta \leq 5$  мкм) по границам зерен остаточного аустенита и карбидов с помощью оптической и просвечивающей микроскопии обнаружены зоны зарождения микротрещин.

ИПО образцов на режиме II приводит к измельчению в 1,5...2 раза аустенитно-мартенситных структурных составляющих ( $D_3 \sim 1,5...5$  мкм) в модифицированном слое 5 ( $\delta = 0...40$  мкм) (рис. 2).

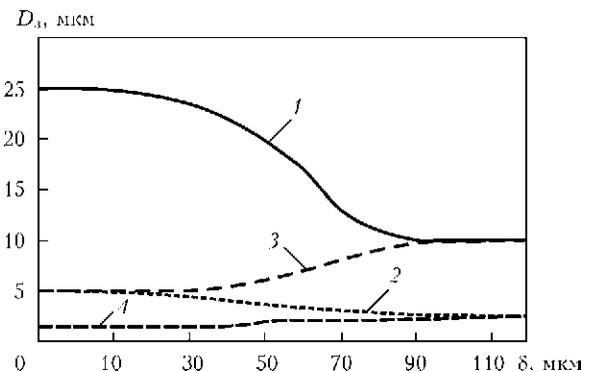


Рис. 2. Изменение размеров структур  $D_3$  (аустенита и мартенсита) по глубине обработанных слоев  $\delta$  образцов из стали Р6М5 после ИПО: 1, 2 — режим I; 3, 4 — режим II

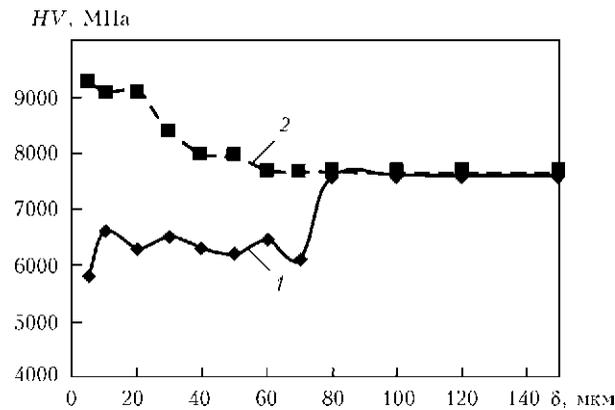


Рис. 3. Изменение микротвердости  $HV$  по глубине обработанных слоев  $\delta$  образцов из стали Р6М5 после ИПО: 1 — режим I; 2 — режим II

Обнаружено также увеличение на 20 % интегральной микротвердости ( $HV 0,05 \leq 9200$  МПа) (рис. 3). Трещинообразования в поверхностном слое 5 после ИПО на режиме II не отмечается. Наблюдаемое измельчение зеренной структуры в слое быстрорежущей стали Р6М5 при ИПО на режиме II обусловлено легированием аустенита при растворении вторичных карбидов. Первичные карбиды не растворяются и тормозят рост зерна аустенита, что приводит к сохранению дисперсной структуры стали Р6М5 при нагреве, близком к температуре плавления.

Исследованиями изменения концентрации химических элементов (железо, хром, вольфрам, ванадий, молибден) по глубине слоя образцов из стали Р6М5, обработанных ИПО на режимах I и II, установлено их равномерное распределение, что свидетельствует об отсутствии дополнительного легирования приповерхностных слоев за счет материала электрода. В упрочненном слое обнаружены карбиды сложного химического состава типа  $Me_6C$  глобулярной формы  $(FeCr)_3(W, Mo)_3C$  с преобладанием вольфрама и размерами частиц  $d_q \sim 0,21...2$  мкм.

Исследованиями на просвет установлено, что структура основного металла ( $\delta > 100$  мкм) пред-

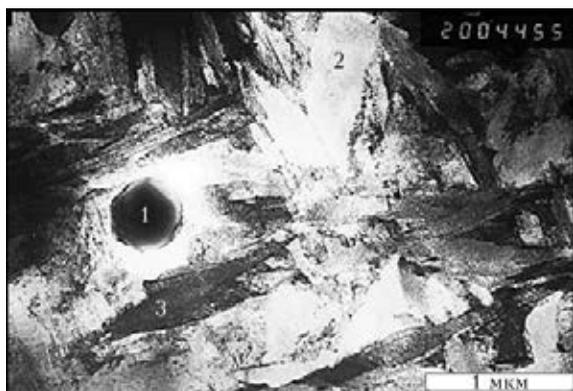


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 20000$ ) основного металла образца из стали Р6М5, ТЭМ: 1 — карбиды; 2 — остаточный аустенит; 3 — мартенсит отпуска

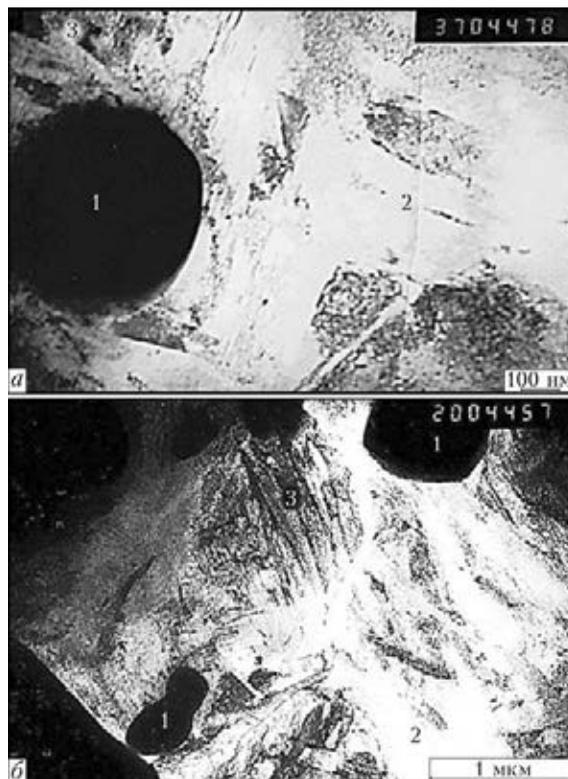


Рис. 5. Микроструктура поверхностных слоев образцов из стали Р6М5 ( $\delta = 5...40$  мкм) после ИПО на режимах I (а,  $\times 37000$ ) и II (б,  $\times 20000$ ), ТЭМ: 1 — карбиды; 2 — остаточный аустенит; 3 — мартенсит

ставлена мартенситом отпуска с  $\rho \leq 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, остаточным аустенитом с  $\rho \leq 10^8...10^9$  см<sup>-2</sup> и карбидами (рис. 4).

В обработанном на режиме I слое ( $\delta \leq 40$  мкм) в зернах аустенита наблюдается укрупнение субструктуры с формированием слабо разориентированной блочной структуры при общей неравномерности плотности дислокаций ( $\rho \sim 10^8...10^9$  см<sup>-2</sup>). В мартенсите этой зоны отмечается резкое снижение плотности дислокаций ( $\rho \sim 10^9...10^{10}$  см<sup>-2</sup>) по сравнению с мартенситом основного металла (рис. 5, а), что объясняет снижение микротвердости (рис. 3). Наиболее плотные ( $\rho \sim (2...4) \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>) и протяженные ( $l \sim 0,2...0,3$  мкм) дислокационные скопления формируются вдоль границ контакта карбидных фаз и внутренних объемов аустенитных зерен, где  $\rho \sim 10^9$  см<sup>-2</sup>.

В оплавленном слое 1 ( $\delta \leq 5$  мкм) наблюдается укрупнение размеров субструктурных элементов (блоков, ячеек) при слабой их разориентировке, а также неравномерное снижение плотности дислокаций при формировании резких градиентов ( $10^8 \leq \rho \leq 10^{10}$  см<sup>-2</sup>) по дислокационной плотности, т. е. концентраторов напряжений — зон зарождения и распространения трещин (рис. 6, а). В переходном слое ( $\delta \sim 40...100$  мкм) с увеличением расстояния от поверхности образца сохраняется тенденция к уменьшению плотности дислокаций, но это снижение не столь значительно по сравнению с перераспределением в обра-

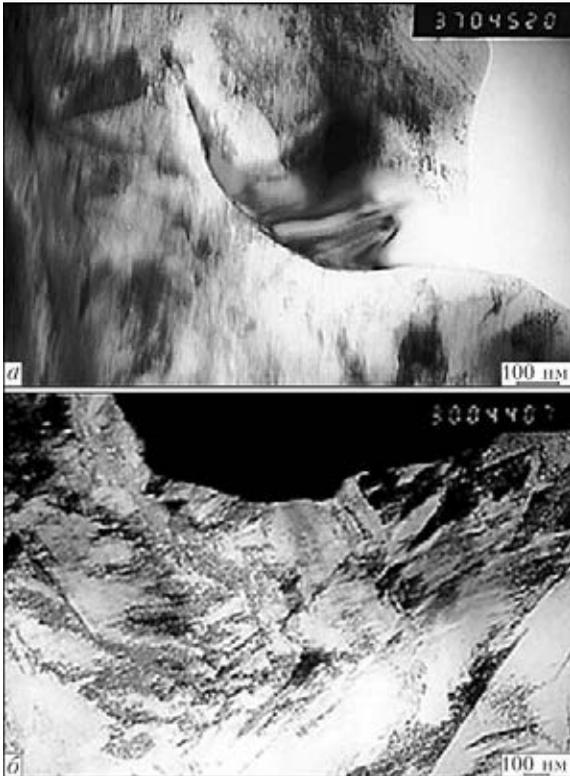


Рис. 6. Микроструктура поверхностных слоев образцов из стали Р6М5 ( $\delta \leq 5$  мкм) после ИПО на режимах I (а,  $\times 37000$ ) и II (б,  $\times 30000$ ), ТЭМ

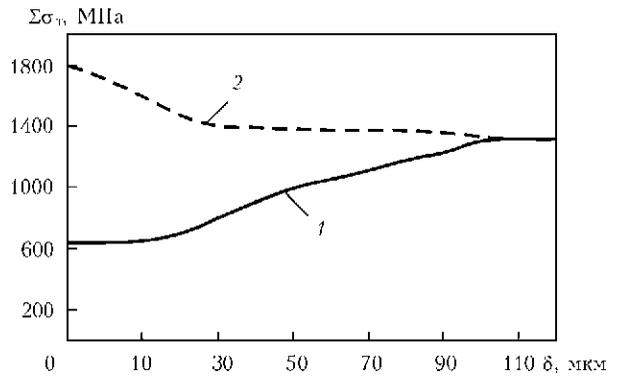


Рис. 7. Изменение средних значений предела текучести  $\Sigma_T$  по глубине обработанных слоев  $\delta$  образцов из стали Р6М5 после ИПО на режимах I (1) и II (2)

гов зарождения и распространения микротрещин, что свидетельствует о значительном упрочнении обработанных слоев.

Для оценки влияния ИПО (различные режимы) на важнейшие эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей инструментов из стали Р6М5 проведена расчетно-аналитическая оценка свойств прочности  $\sigma_T$ , вязкости разрушения  $K_{1c}$  и трещиностойкости  $\tau_{л.вн}/\tau_{теор}$  модифицированного слоя стали. Установлено, что после ИПО на режиме I, приводящей к оплавлению поверхностного слоя сплава, снижается общий уровень  $\Sigma\sigma_T$  в обработанной поверхности ( $\delta \leq 40$  мкм) по сравнению с основным металлом на 50 % (640...940 МПа при 1300...1800 МПа в основном металле) (рис. 7). Наблюдаемое снижение прочности сплава в поверхностном слое обусловлено снижением вклада субструктурного упрочнения  $\Delta\sigma_c \sim 190...300$  МПа по сравнению с  $\Delta\sigma_c \sim 590...780$  МПа в основном металле, зеренного  $\Delta\sigma_3 \sim 200...330$  МПа по сравнению с  $\Delta\sigma_3 \sim 280...480$  МПа в основном металле, дислокационного  $\Delta\sigma_d \sim 20...50$  МПа по сравнению с 200 МПа в основном металле. Следовательно, разупрочнение в оплавленном слое сплава (режим I,  $\rho \sim 40$  мкм), обусловлено преимущественно влиянием укрупнения структуры, субструктуры, снижением плотности дислокаций и неравномерным их распределением.

ботанном ИПО слое. Кроме того, наблюдается увеличение микрообъемов со структурой отпуска (субструктура, блоки), что резко контрастирует со структурой основного металла, для которой характерна более мелкодисперсная структура с плотными и равномерно распределенными дислокациями.

Исследованиями тонкой (дислокационной) структуры показано, что ИПО на режиме II приводит к повышению плотности дислокаций в обработанном слое ( $\delta \leq 40$  мкм) до  $\rho \leq 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> в мартенсите по сравнению с  $\rho \leq 10^{11}$  см<sup>-2</sup> в основном металле (рис. 4, 5, б), что согласуется с результатами измерения микротвердости. Для зерен остаточного аустенита наблюдается измельчение субструктуры, формирование разориентированной блочной структуры при общей равномерности дислокационной плотности ( $\rho \sim 4 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>). Показано, что для мартенситных зерен также характерно измельчение субструктуры (ширина реек меньше в 2 раза по сравнению с основным металлом). С увеличением расстояния от поверхности сохраняется тенденция к снижению плотности дислокаций и увеличению микрообъемов со структурой отпуска (субструктура, блоки).

Таким образом, установлено, что в приповерхностных слоях сплава Р6М5 после ИПО на режиме II наблюдается диспергирование структуры, увеличение плотности дислокаций и отсутствие протяженных дислокационных скоплений — оча-

При использовании режима II ИПО по глубине обработанного слоя ( $\delta \sim 0...40$  мкм) общий уровень прочности повышается на 25 % (1400...2160 МПа при 1300...1800 МПа в основном металле). Это обусловлено возрастанием вклада субструктурного ( $\Delta\sigma_c \sim 490...870$  МПа), зеренного ( $\Delta\sigma_3 \sim 440...640$  МПа), дислокационного ( $\Delta\sigma_d \sim 200...283$  МПа) упрочнений, а также упрочнения за счет дисперсных частиц ( $\Delta\sigma_q \sim 60...150$  МПа). Это также обусловлено измельчением структуры, повышением общей плотности дислокаций, а также реализацией механизма дисперсионного упрочнения в приповерхностных слоях сплава.

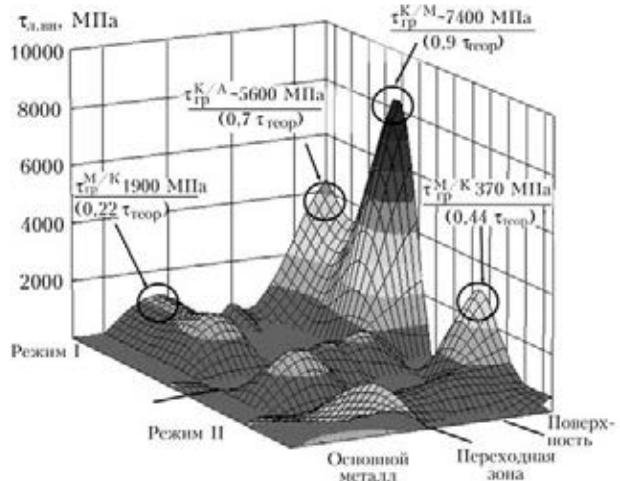


Рис. 8. Уровень локальных внутренних напряжений  $\tau_{л.вн}$  в сопоставлении с теоретической прочностью  $\tau_{теор}$  в приповерхностных слоях и в основном металле образцов из стали Р6М5 в зависимости от режимов ИПО (К/М, К/А — границы сопряжения структур карбид-мартенсит, карбид — аустенит соответственно)

Оценка локальных внутренних напряжений  $\tau_{л.вн}$  и их градиентов  $\Delta\tau_{вн}$  вдоль границ структурных составляющих, соотношение этих значений с теоретической прочностью материала по глубине в слое от обработанной ИПО поверхности до основного сплава Р6М5 приведены на рис. 8.

Показано, что после ИПО сплава Р6М5 на режиме I в приповерхностных слоях ( $\delta \sim 0...40$  мкм от внешней поверхности) при общем снижении плотности дислокаций и разупрочнении наблюдаются наиболее высокие значения  $\tau_{л.вн}$ , формирующиеся на границах сопряжения структур мартенсит/карбид (М/К), что составляет 5600...7400 МПа или  $(0,67...0,9)\tau_{теор}$ . Градиенты локальных внутренних напряжений  $\Delta\tau_{вн}$  по границам этих структурных элементов составляют  $\sim 5200...7000$  МПа и являются потенциальными источниками трещинообразования. После ИПО на режиме II наблюдается повышение  $\rho$  (от  $10^{11}$  до  $2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>) по сравнению с необработанным сплавом при сравнительно равномерном распределении дислокационных скоплений, что не приводит к формированию резких градиентов внутренних напряжений  $\Delta\tau_{л.вн}$ . Такого типа дислокационные скопления соответствуют значениям  $\tau_{л.вн} \sim 1480...3700$  МПа, что составляет  $\sim 0,018...0,44$  от теоретической прочности  $\tau_{теор}$ . При этом максимальные значения  $\tau_{л.вн}$  ( $\sim 3700$  МПа) характерны для границ сопряжения структур М/К и не представляют опасности для трещинообразования.

Роль структурных факторов проявляется и в изменении прочности приповерхностных слоев инструмента из сплава Р6М5, а именно — свойств прочности  $\sigma_T$  в сочетании с характеристикой вязкости  $K_{Ic}$ , что иллюстрируют соответствующие диаграммы (рис. 9). Установлено, что значение  $K_{Ic}$  сплава в модифицированном слое на режиме

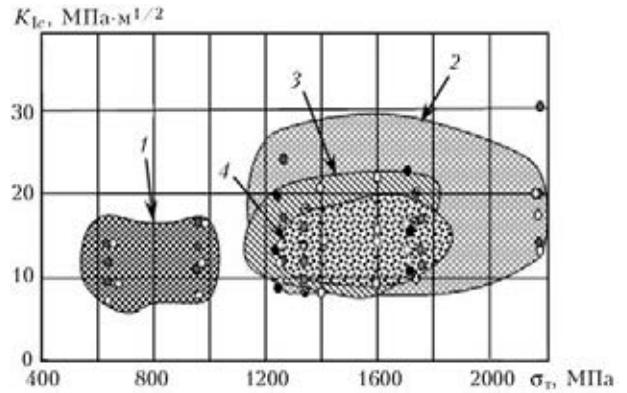


Рис. 9. Изменение прочности  $\sigma_T$  и вязкости  $K_{Ic}$  стали Р6М5 по глубине обработанных слоев ( $\delta \sim 0...100$  мкм) образцов из стали Р6М5 после ИПО на режимах I и II по сравнению с основным металлом: 1 — режим I; 2 — режим II; 3 — переходная область; 4 — основной металл

I (с оплавлением) на 35 % ниже, чем на режиме II (без оплавления). При этом прочностные свойства также снижаются в 1,8 раза. После ИПО на режиме II в модифицированном слое сплава значение  $K_{Ic}$  металла на 15 % выше, чем в основном металле при значительном упрочнении всего слоя.

Таким образом, на основании проведенных исследований и выполненных расчетов установлено, что применение режима II может быть рекомендовано для ИПО быстрорежущей стали Р6М5, поскольку приводит к таким структурно-фазовым изменениям, которые обеспечивают существенное повышение важнейших эксплуатационных свойств: прочности, пластичности и трещиностойкости.

**Выводы**

1. Импульсно-плазменная обработка образцов из стали Р6М5 с использованием режима прямого действия импульсного электрического разряда (режим I) приводит к разупрочнению поверхностного слоя.
2. Показано, что на режиме II по глубине слоя обработанной поверхности ( $\delta \sim 0...40$  мкм) общий уровень прочности повышается до 1400...2160 МПа при 1300...1800 МПа в основном металле, что обусловлено вкладом субструктурного ( $\Delta\sigma_c \sim 490...870$  МПа), зеренного ( $\Delta\sigma_z \sim 440...640$  МПа), дислокационного ( $\Delta\sigma_d \sim 200...283$  МПа) механизмов упрочнения, а также упрочнения за счет дисперсных частиц ( $\Delta\sigma_{ч} \sim 60...150$  МПа).
3. Установлено, что высокий уровень прочности и трещиностойкости (до  $\sim 26$  МПа·м<sup>1/2</sup>) поверхностного слоя стали Р6М5, после ИПО на режиме II достигается при измельчении ( $D_3 \sim 1...5$  мкм) зеренной структуры стали.
4. Импульсно-плазменная обработка образцов с применением электрического разряда косвенного действия (режим II) улучшает структурно-фазовое состояние модифицированного слоя и повышает комплекс его физико-механических



свойств, поэтому режим II является рекомендуемым для обработки быстрорежущей стали Р6М5.

1. *Массоперенос и фазообразование в металлах при импульсных воздействиях* / В. М. Миронов, В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцикен, А. В. Филатов. — Самара: Самар. ун-т, 2001. — 232 с.
2. *Бураков В. В., Федосеенко С. С.* Формирование структур повышенной износостойкости при лазерной закалке металлообрабатывающего инструмента // *Металловедение и термич. обраб. металлов.* — 1983. — № 5. — С. 16–17.
3. *Вольхин С. А.* Влияние структуры инструментальных сталей после закалки и отпуска на параметры лазерно-упрочненных слоев // *Судостроит. пром-сть.* — 1990. — № 23, — С. 44–48.
4. *Собусяк Т., Соколов К. Н.* Влияние лазерной термической обработки на структуру и свойства быстрорежущей стали // *Пробл. машиностр. и автоматиз.* — 1991. — № 5. — С. 45–53.
5. *Кикин П. Ю., Пчелинцев А. И., Русин Е. Е.* Повышение теплостойкости и износостойкости быстрорежущих сталей лазерным ударно-волновым воздействием // *Физ. и химия обраб. материалов.* — 2003. — № 5. — С. 15–17.
6. *Гуреев Д. М., Ламтин А. П., Чулкин В. Н.* Влияние импульсного лазерного излучения на состояние кобальтовой прослойки твердых сплавов // *Там же.* — 1990. — № 1. — С. 51–54.
7. *Бабушкин В. Б.* Особенности структурообразования в быстрорежущих и высокохромистых штамповых сталях при лазерном нагреве // *Изв. вузов. Сер. Черн. металлургия.* — 1990. — № 4. — С. 68–70.
8. *Структура и механические свойства инструментов из быстрорежущей стали при импульсно-плазменной поверхностной обработке* / Л. И. Маркашова, О. В. Колисниченко, М. Л. Валевиц, Д. Г. Богачев // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. — Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2012. — Вып. 64. — С. 211–220.*
9. *Аналитическая оценка вклада структурных параметров в изменение механических свойств быстрорежущей стали после импульсно-плазменной поверхностной обработке* / Л. И. Маркашова, Ю. Н. Тюрин, О. В. Колисниченко и др. // *Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Шестой междунар. конф. / Под ред. В. И. Махненко.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2012. — С. 49–53.
10. *Cordier-Robert C., Crampon J., Foct J.* Surface alloying of iron by laser melting: microstructure and mechanical properties // *Surface Eng.* — 1998. — **14**, № 5. — P. 381–385.
11. *Чудина О. В., Боровская Т. М.* Упрочнение поверхности сталей легированием при лазерном нагреве с последующей химико-термической обработкой // *Металловедение и термич. обраб. металлов.* — 1994. — № 12. — С. 2–7.
12. *Чудина О. В.* Поверхностное легирование железоуглеродистых сплавов с использованием лазерного нагрева // *Там же.* — 1997. — № 7. — С. 11–14.
13. *Laser coating proven in practice* / U. Ritter, W. Kahrmann, R. Kurpfer, R. Glardon // *Surface Eng.* — 1992. — **8**, № 4. — P. 381–385.
14. *Lugscheider E., Boplender H, Krappitz H.* Laser cladding of paste bound hardfacing alloys // *Ibid.* — 1992. — **7**, № 4. — P. 341–344.
15. *Surface treatment of steel by laser transformation hardening* / E. Navara, B. Bengsston, Wen-Ben Li, K. E. Easterling // *Proc. of the Third Intern. congr. on heat treatment of materials, Shanghai, 7–11 Nov., 1983.* — Shanghai: Metal Society, 1984. — P. 40–44.
16. *Твердохлебов Т. Н., Дьяченко В. С.* Влияние условий лазерной обработки на стойкость инструмента из быстрорежущей стали // *Металлорежущее оборудование и инструмент.* — М.: Машиностроение, 1980. — С. 17–21.
17. *Лазерная модификация быстрорежущей стали* / Ханкок И. М. и др. // *Heat Treat–87: Proc. Int. conf., London, 11–15 May, 1987.* — London: Metal Society, 1988. — P. 189–195.
18. *Тюрин Ю. Н., Жадкевич М. Л.* Плазменные упрочняющие технологии. — Киев: Наук. думка, 2008. — 218 с.
19. *Сузуки Х.* О пределе текучести поликристаллических металлов и сплавов // *Структура и механические свойства металлов.* — М.: Металлургия, 1967. — С. 255–260.
20. *Эйби И. Ф.* О напряжении Орована // *Физика прочности и пластичности.* — М.: Металлургия, 1972. — С. 88–107.
21. *Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 307 с.
22. *Конрад Г.* Модель деформационного упрочнения для объяснения влияния величины зерна на напряжение течения металлов // *Сверхмелкое зерно в металлах / Под ред. Л. К. Гордиенко.* — М.: Металлургия, 1973. — С. 206–219.
23. *Армстронг Р. В.* Прочностные свойства металлов со сверхмелким зерном // *Там же.* — М.: Металлургия, 1973. — С. 11–40.
24. *Petch N. J.* The cleavage strength of polycrystalline // *J. Iron and Steel Inst.* — 1953. — **173**, № 1. — P. 25–28.
25. *Orowan E.* Dislocation in metals. — New York: AIME, 1954. — 103 p.
26. *Ashby M. F.* Mechanisms of deformation and fracture // *Adv. Appl. Mech.* — 1983. — **23**. — P. 118–177.
27. *Келли А., Николсон Р.* Дисперсное твердение. — М.: Металлургия, 1966. — 187 с.
28. *Ebelling R., Ashby M. F.* Yielding and flow of two phase copper alloys // *Phil. Mag.* — 1966. — **13**, № 7. — P. 805–809.
29. *Романив О. Н.* Вязкость разрушения конструкционных сталей. — М.: Металлургия, 1979. — 176 с.
30. *Дислокационные-дисклинационные субструктуры и упрочнения* / Н. А. Конева, Д. В. Лычагин, Л. А. Теплякова, Э. В. Козлов // *Теоретическое и экспериментальное исследование дисклинаций.* — Л.: Изд-во ЛФТИ, 1986. — С. 116–126.
31. *Conrad H.* Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel // *Acta met.* — 1963. — **11**. — P. 75–77.

Поступила в редакцию 06.06.2013



# ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА РЕМОНТНЫХ ШВОВ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНОЙ СВАРКИ

А. А. РЫБАКОВ, Т. Н. ФИЛИПЧУК, Ю. В. ДЕМЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследованы структура и свойства металла ремонтных швов, выполняемых многопроходной сваркой при исправлении дефектов в швах газо-, нефтепроводных труб. Определены изменения химического состава и ударной вязкости при отрицательных температурах, а также особенности структурных характеристик металла отдельных проходов ремонтных швов. Показано, что при ручной дуговой и механизированной сварке под флюсом и в защитных газах с применением традиционных для производства труб сварочных материалов металл последних проходов ремонтного шва чрезмерно обогащается теми или иными легирующими элементами (марганцем, кремнием, хромом, молибденом и др.), присутствующими в таких материалах. Это приводит к формированию неблагоприятной структуры: участков верхнего бейнита, развитой сетки полигонизационных границ, пограничных выделений углеродистой второй фазы, что в свою очередь провоцирует образование в швах холодных трещин. С учетом результатов исследований разработаны требования к химическому составу сварочной проволоки для исправления дефектов в швах труб многопроходной сваркой, предусматривающие ограничение содержания легирующих элементов. При многопроходной сварке под флюсом предложено также применять алюминатный флюс. Проволока рекомендованного состава апробирована при исправлении дефектов в швах труб сваркой в защитном газе и обеспечила высокую ударную вязкость металла ремонтных швов в сочетании с достаточной стойкостью против возникновения трещин. Результаты исследований могут быть использованы для исправления дефектов в швах при производстве труб, а также многопроходной сварке других металлических конструкций. Библиогр. 5, табл. 4, рис. 7.

*Ключевые слова:* труба, шов, ремонт, дефекты, многопроходная сварка, сварочные материалы, ударная вязкость, структура, трещины

Известно, что при изготовлении труб большого диаметра, свариваемых многодуговой сваркой под флюсом, исправлять в швах отдельные внутренние дефекты (поры, шлаковые включения, непровары или несплавления) посредством их предварительного удаления и последующего заполнения образовавшейся канавки многослойной сваркой допускается в ограниченном количестве (например, не более чем на 5 % труб) [1–3 и др.]. Согласно действующим нормативным документам длина такого «ремонтного» участка должна находиться в пределах 50...500 мм. При этом предполагается, что качественные показатели таких участков, в том числе уровень механических свойств металла, должны соответствовать требованиям, предъявляемым к основным сварным соединениям труб.

Исправление дефектов в швах труб выполняют ручной дуговой сваркой, механизированной сваркой под флюсом или в защитном газе. Количество необходимых проходов ремонтного шва определяется глубиной канавки, образуемой при удалении дефекта, что в свою очередь зависит от места его расположения в сечении шва и толщины

стенки трубы. В типовых случаях, например, для труб с толщиной стенки 15...20 мм выполняют до шести – десяти проходов ремонтного шва. В странах СНГ при механизированной сварке под флюсом преимущественно применяют плавный марганцевый высококремнистый флюс АН-60 и проволоку типа Св-10Г2. Такое сочетание сварочных материалов обеспечивает сравнительно низкие показатели вязких характеристик металла ремонтного шва (на уровне 30 Дж/см<sup>2</sup> при 0°С). Между тем требования к вязким свойствам металла швов собственно труб, в том числе в местах исправления дефектов, существенно возросли. Согласно действующим нормативным документам наиболее часто средние значения ударной вязкости металла сварных соединений труб для магистральных трубопроводов должны быть не менее 49 Дж/см<sup>2</sup> при –20 °С, а для трубопроводов, прокладываемых под водой, такие же требования при –30 °С и даже –40 °С. Для обеспечения этих показателей требуется оптимизировать химический состав металла ремонтных швов, в том числе сварочных материалов, обеспечивающих более высокое легирование.

Как показано в работе [4], при исправлении дефектов в швах труб с помощью многослойной



сварки присутствует еще одна проблема, связанная с образованием холодных трещин в ремонтируемых участках швов. Отмечается, что их возникновение обусловлено повышением в последних слоях ремонтного шва массовой доли легирующих элементов. Так, в случае использования флюса АН-60 и проволоки Св-10Г2 при исправлении дефектов в продольном шве труб с толщиной стенки 15,7 мм содержание марганца в последнем (в нашем случае, пятом) проходе ремонтного шва возросло до 2,4 %, а кремния — до 1,0 %. Для сравнения отметим, что в металле собственно продольного шва трубы количество этих элементов не превышало 1,73 и 0,45 % соответственно. В результате в металле замыкающих проходов ремонтного шва формировались участки с неблагоприятной структурой, что при охлаждении металла в условиях относительно жесткого контура провоцировало образование указанных холодных трещин. Следует полагать, что в случае применения сварочных материалов, обеспечивающих более высокое легирование, и большей толщины стенки свариваемых труб, а следовательно, и большего количества проходов, опасность ухудшения структуры металла и возникновения трещин в участках ремонта будет возрастать.

В настоящей статье рассмотрены результаты исследований, проведенных авторами при решении задачи оптимизации химического состава и структуры металла швов в местах исправления дефектов дуговой сваркой, с целью обеспечения повышенных требований к вязким характеристикам металла швов и предотвращения образования холодных трещин.

Ремонт (имитацию операции ремонта дефектов, залегающих на глубине примерно 10...12 мм) проводили на образцах труб размером 1420×18,7 мм из стали Х70 с продольными швами, сваренными под флюсом АН-60 проволокой Св-08Г1НМА. На образцах, вырезанных из труб, по центру продольного шва специализированными электродами АНР-2 выполняли выборку глубиной 15 мм, которая имитировала удаление дефекта. В некоторых случаях при использовании образцов труб с толщиной стенки 15,7 мм глубина канавки перед сваркой составляла 10 мм. Содержание основных элементов в металле продольного шва находилось в следующих пределах, мас. %: 0,05...0,06 С; 1,62...1,79 Мп; 0,429...0,470 Si; 0,008...0,009 Nb, 0,150...0,190 Мо; 0,180...0,236 Ni; 0,015...0,018 Ti. Некоторое колебание содержания отдельных элементов в металле продольного шва связано с использованием в опытах труб из стали Х70 различной толщины (разного химического состава).

Выборки преимущественно заполняли механизированной сваркой в CO<sub>2</sub>, смеси Ar + 20 % CO<sub>2</sub>

Таблица 1. Содержание основных легирующих элементов в сварочных проволоках, мас. %

Марка проволоки	С	Мп	Si	Ni	Мо	Cr
Св-08ГА	0,09	0,95	0,05	0,14	—	—
Св-10Г2	0,10	1,70	0,05	0,12	—	—
Св-08Г2С	0,09	2,01	0,85	0,11	—	—
Св-08ХМ	0,08	0,50	0,20	0,14	0,50	1,02
Св-08ГМ	0,08	1,19	0,35	0,11	0,59	—
Св-08Г1НМА	0,09	1,20	0,31	0,49	0,52	—
S2Mo	0,07	1,15	0,21	0,11	0,50	—
G MoSi	0,10	1,11	0,60	—	0,50	—

и под флюсом, а на отдельных образцах — ручной дуговой сваркой. Заварку канавок глубиной 15 мм выполняли за восемь проходов, а глубиной 10 мм — за пять проходов. Применяли типовые сварочные материалы, используемые при производстве труб: для сварки под флюсом — проволоку Св-08ГА, Св-10Г2, Св-08ХМ, Св-08ГМ, Св-08Г1НМА, S2Mo и флюс АН-60, АН-67Б, ОР 107, ОР 132, ОК 10.71, ОК 10.74; для сварки в защитном газе — проволоку Св-08Г2С, G MoSi; для ручной дуговой сварки — электроды Schwarz 3К. Химический состав сварочных проволок приведен в табл. 1. Сварку под флюсом выполняли проволокой диаметром 2,5 мм ( $I_{св} = 320...350$  А,  $U_{д} = 28...30$  В,  $v_{св} = 17...20$  м/ч), в защитном газе — проволокой диаметром 1,2 мм ( $I_{св} = 160...180$  А,  $U_{д} = 26...28$  В), а ручную дуговую сварку — электродами диаметром 3,2 мм ( $I_{св} = 130...150$  А,  $U_{д} = 25...26$  В).

От выполненных соединений отбирали образцы для определения химического состава металла шва, его ударной вязкости и металлографических исследований. Анализ химического состава металла отдельных проходов выполняли спектральным методом на приборе «Спектровак 1000» фирмы «Baird» и дифракционном спектрометре «ДФС-36». Зоны контроля химического состава, представленные на рис. 1, располагались в металле ремонтируемого продольного шва (зона 1), в металле первого прохода ремонтного шва (зона 2), в металле промежуточных проходов (зоны 3, 4) и в металле замыкающего прохода этого шва (зона 5). Испытания на ударную вязкость проводили при температуре от -10 до -40 °С на образцах с острым надрезом, наносимым по центру наплавки согласно ГОСТ 6996. Микроструктуру металла изучали с применением оптической и растровой электронной микроскопии при увеличении 50-500 на шлифах после травления в нитале (4 % спиртовом растворе азотной кислоты), в горячем растворе пикрата натрия и насыщенном водном растворе пикриновой кислоты.

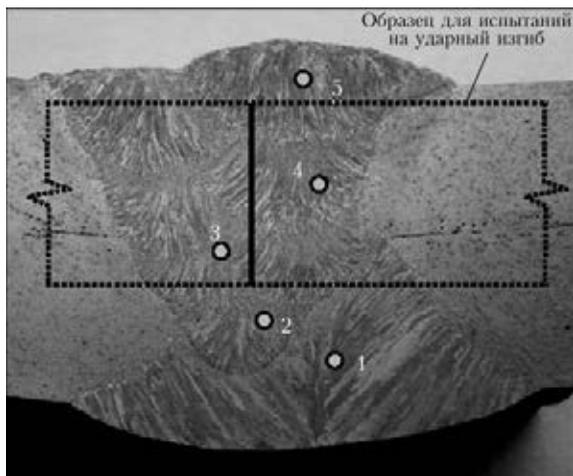


Рис. 1. Характерный макрошлиф исследуемых ремонтных швов и зоны определения химического состава (1...5)

Установлено, что для всех исследуемых вариантов сочетаний сварочных материалов по мере увеличения количества проходов ремонтного шва уровень легирования металла закономерно возрастает. Как видно из рис. 2, количество марганца и кремния уже в металле второго прохода возрастает до 2,35 и 0,62 % соответственно и далее в последующих проходах продолжает увеличиваться вплоть до максимальных значений в замыкающем проходе: 2,85 и 0,99 % соответственно. Аналогично изменяется содержание хрома и молибдена, что показано на примере использования в процессе исправления дефектов проволокой Св-08ХМ (рис. 3).

Интенсивность нарастания массовой доли того или иного легирующего элемента в первую очередь определяется применяемыми сварочными материалами. Как видно из рис. 4, наибольшее количество кремния, как и следовало ожидать, присутствует в последнем проходе шва, выполняемом с применением кислого высококремнистого флюса АН-60, причем его содержание в металле данного прохода возрастает от 0,76 до 0,99 % по мере увеличения массовой доли марганца в сварочной проволоке (напомним, что в продольном шве трубы количество кремния не превышало 0,45 %). Переход кремния из флюса в металл ремонтного шва заметно снижается с уменьшением во флюсе количества SiO<sub>2</sub>. Минимальный рост количества кремния наблюдается при применении для рассматриваемой цели плавленого нейтрального флюса АН-67Б или керамического алюминатно-основного флюса типа ОР 132.

Содержание марганца в металле многопроходных ремонтных швов в большей мере зависит от его количества в сварочной проволоке. Так, при применении проволоки Св-10Г2 с 1,7 % марганца массовая доля этого элемента в металле последнего прохода составила 2,85 %. При меньшем количестве марганца, например, в проволоке Св-08Г1НМА (1,2 % Мп) или Св-08ХМ (0,50 %

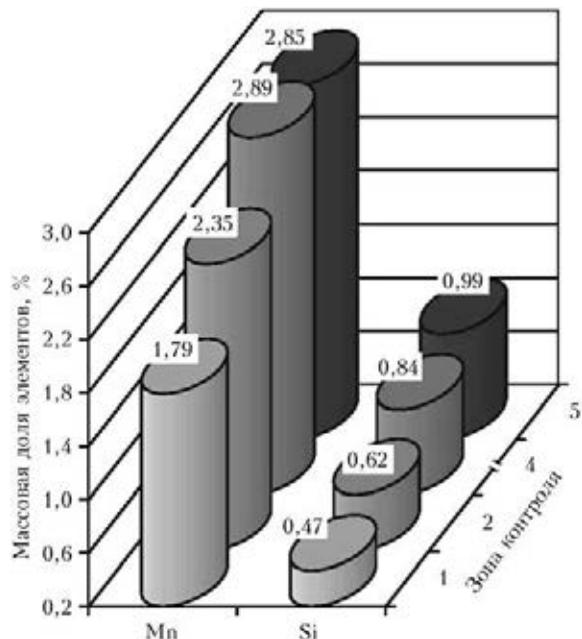


Рис. 2. Массовая доля марганца и кремния в металле различных проходов ремонтного шва, выполненного проволокой Св-10Г2 под флюсом АН-60

Мп), его максимальное количество в ремонтном шве снижалось до 1,97 и 1,77 % соответственно. Темп нарастания других легирующих элементов в исследуемых многопроходных швах также определялся их содержанием в сварочной проволоке.

Обобщенные данные о химическом составе металла последних проходов ремонтных швов, выполненных за восемь или пять проходов, для разных способов сварки и сварочных материалов приведены в табл. 2. Видно, что использование практически любого из обычно применяемых при производстве труб сочетаний сварочных материалов приводит к значительному росту массовой

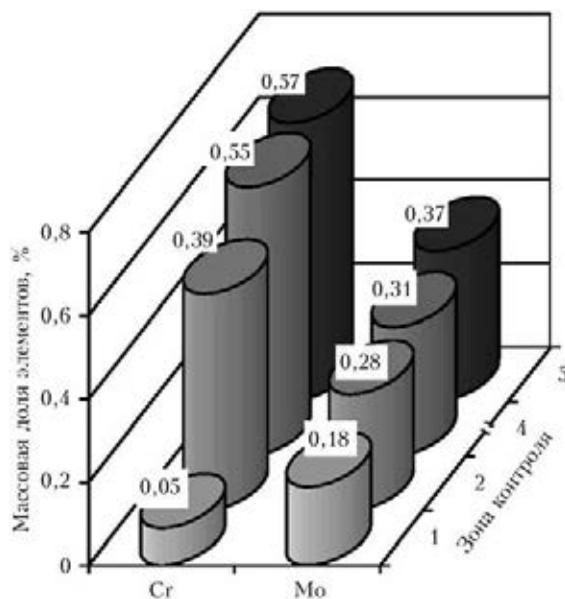


Рис. 3. Массовая доля хрома и молибдена в металле различных проходов ремонтного шва, выполненного проволокой Св-08ХМ под флюсом АН-67Б



**Т а б л и ц а 2. Химический состав металла последних проходов ремонтных швов (мас. %), выполненных различными способами сварки и различными сварочными материалами**

Номер варианта	Сварочные материалы	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	
<i>Ручная дуговая сварка</i>									
1	Schwarz 3K	0,055	0,268	1,22	0,011	0,015	0,05	0,422	
<i>Механизированная сварка в защитном газе</i>									
2	Св-08Г2С, CO <sub>2</sub>	0,081	0,569	1,48	0,013	0,016	0,06	0,021	
3	Св-08Г2С, Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	0,089	0,810	1,40	0,014	0,016	0,06	0,022	
4	G MoSi, Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	0,093	0,408	0,88	0,009	0,017	0,07	0,461	
<i>Механизированная сварка под флюсом</i>									
5*	Св-10Г2	АН-60	0,073	0,990	2,854	0,016	0,021	0,05	0,003
6*		АН-67Б	0,080	0,320	2,390	0,016	0,024	0,05	0,022
7		ОР 107	0,065	0,460	2,376	0,016	0,023	0,06	0,028
8		ОК 10.71	0,088	0,723	2,368	0,015	0,022	0,06	0,027
9	Св-08Г1НМА	АН-60	0,044	0,974	1,967	0,017	0,026	0,03	0,534
10		АН-67Б	0,056	0,281	2,348	0,015	0,022	0,03	0,515
11		ОР 107	0,059	0,442	2,117	0,017	0,023	0,04	0,404
12		ОК 10.71	0,071	0,670	2,156	0,015	0,024	0,05	0,431
13*	Св-08ХМ	АН-60	0,072	0,761	1,770	0,017	0,025	0,67	0,368
14*		АН-67Б	0,073	0,254	1,748	0,017	0,027	0,57	0,356
15		ОР 107	0,049	0,431	1,701	0,016	0,023	0,58	0,411
16*	S2Mo	ОК 10.74	0,059	0,613	1,740	0,016	0,028	0,07	0,461
17*	Св-08ГМ	ОК 10.74	0,060	0,618	1,600	0,017	0,029	0,06	0,470

Звездочкой отмечены номера вариантов ремонтных швов, выполненных за восемь проходов.

доли тех или иных легирующих элементов в замыкающих проходах исследуемых швов. Так, при сварке под флюсом чрезмерное количество марганца присутствует в случае применения проволоки Св-10Г2, кремния — флюса АН-60, ОК 10.71, ОК 10.74, хрома — проволоки Св-08ХМ, молибдена — проволоки Св-08Г1НМА, Св-08ГМ, Св-08ХМ, S2Mo. Такие же данные получены и при применении других способов сварки. Например, в металле ремонтных швов, свариваемых в защитном газе, возрастает содержание кремния (проволока Св-08ГА, особенно при сварке в смеси Ar + 20 % CO<sub>2</sub>) или молибдена (проволока G MoSi). В металле последних проходов ремонтных швов, выполненных ручной дуговой сваркой электродами Schwarz 3K с массовым содержанием молибдена 0,50 %, выявлено повышенное количество этого элемента.

Увеличение содержания легирующих компонентов в металле ремонтных швов сопровождается, как отмечалось, соответствующим изменением его структуры. Так, при выполнении многослойных наплавки марганцовистой проволо-

кой Св-08ГА или Св-10Г2, когда содержание марганца в металле последних проходов возрастает до 2,4...2,8 %, в структуре металла, кроме игольчатых форм феррита, наблюдается значительное количество пластинчатого феррита с упорядоченной карбидной фазой, видманштеттвого феррита, а также отдельные участки полигонального доэвтектоидного феррита и перлита. Металлу с такой

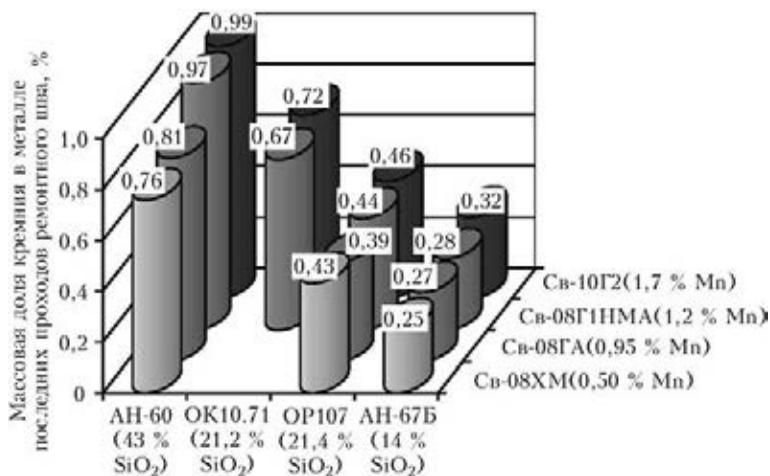


Рис. 4. Зависимость содержания кремния в металле последних проходов ремонтного шва от применяемых сварочных материалов (в скобках дано содержание марганца в проволоке и SiO<sub>2</sub> во флюсе)

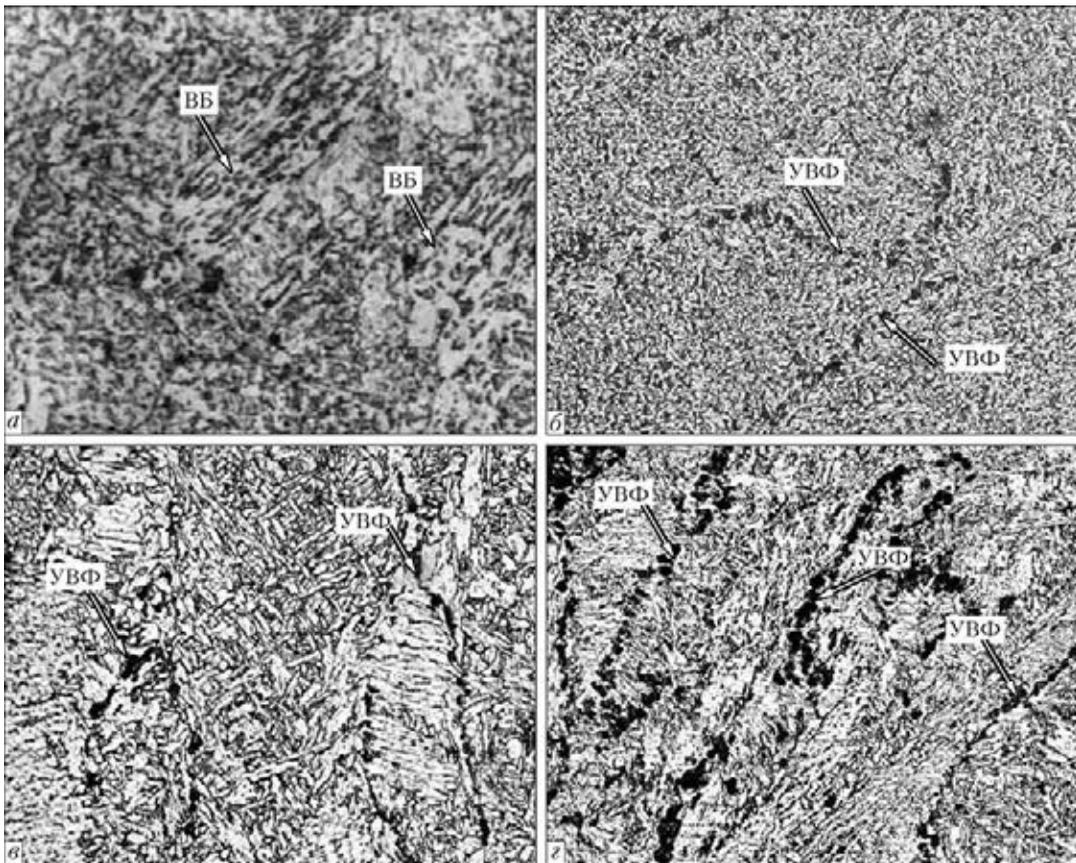


Рис. 5. Характерная микроструктура металла последних (а) и промежуточных (б–з) проходов ремонтных швов с повышенным содержанием легирующих элементов (травление в 4 % растворе азотной кислоты): а, б — механизированная сварка под флюсом: проволока S2Mo, флюс ОК 10.74 (табл. 2, вариант 16\*), соответственно  $\times 500$ , 300; в — ручная сварка: электроды Schwarz 3K (табл. 2, вариант 1),  $\times 500$ ; з — механизированная сварка в защитном газе: проволока G MoSi, Ar + 20 % CO<sub>2</sub> (табл. 2, вариант 4),  $\times 500$  (BB — участки со структурой верхнего бейнита; УВФ — углеродистая вторая фаза (карбиды, МАК-фаза))

структурой присущи довольно низкие характеристики вязкости. Обогащение такого металла кремнием из флюса или проволоки приводит к дополнительному охрупчиванию ферритной матрицы.

При выполнении многослойных ремонтных швов легированными проволоками (Св-08Г1НМА, Св-08ХМ, Св-08ГМ, S2Mo, G MoSi) с массовой долей молибдена более 0,5 % из-за повышенного содержания марганца, молибдена и хрома, снижающих температуру превращения аустенита, в металле последних проходов, наряду с игольчатым ферритом, формируются участки верхнего бейнита (рис. 5, а), увеличивается количество МАК-фазы, образуется развитая сетка полигонизационных границ. Формирование отдельных полигонизационных границ в металле ремонтного шва, выполненного указанными проволоками, начинается при сварке второго прохода, а в третьем и последующих проходах эти границы располагаются в виде замкнутых контуров. Кроме того, в подвергнутом повторному нагреву металле промежуточных проходов, где содержание молибдена уже значительно, формируются пограничные образования углеродистой второй фазы: МАК-фа-

зы и карбидов (рис. 5, б). Аналогичные скопления углеродистой фазы по границам кристаллитов и полигонизационным границам присутствуют также в металле промежуточных проходов при ручной дуговой сварке (рис. 5, в; табл. 2, вариант 1) и сварке в защитном газе (рис. 5, з; табл. 2, вариант 4) электродами или проволокой, легированными молибденом. Указанные структурные особенности обуславливают пониженную стойкость металла таких ремонтных швов против образования трещин, что подтверждается наличием таких дефектов в исследуемых образцах в виде крупных трещин, выходящих на поверхность шва, и сетки микротрещин, локализующихся преимущественно по зернограничным образованиям углеродистой второй фазы: МАК-фазы и карбидов (рис. 6).

Известно, что для обеспечения вязких характеристик металла шва на микролегированной, в том числе трубной, стали в качестве легирующих элементов активно используют молибден (или молибден в сочетании с никелем). Например, при производстве труб для продольных или спиральных швов применяют проволоку типа S2Mo и S3NiMo [5]. Результаты наших испытаний на

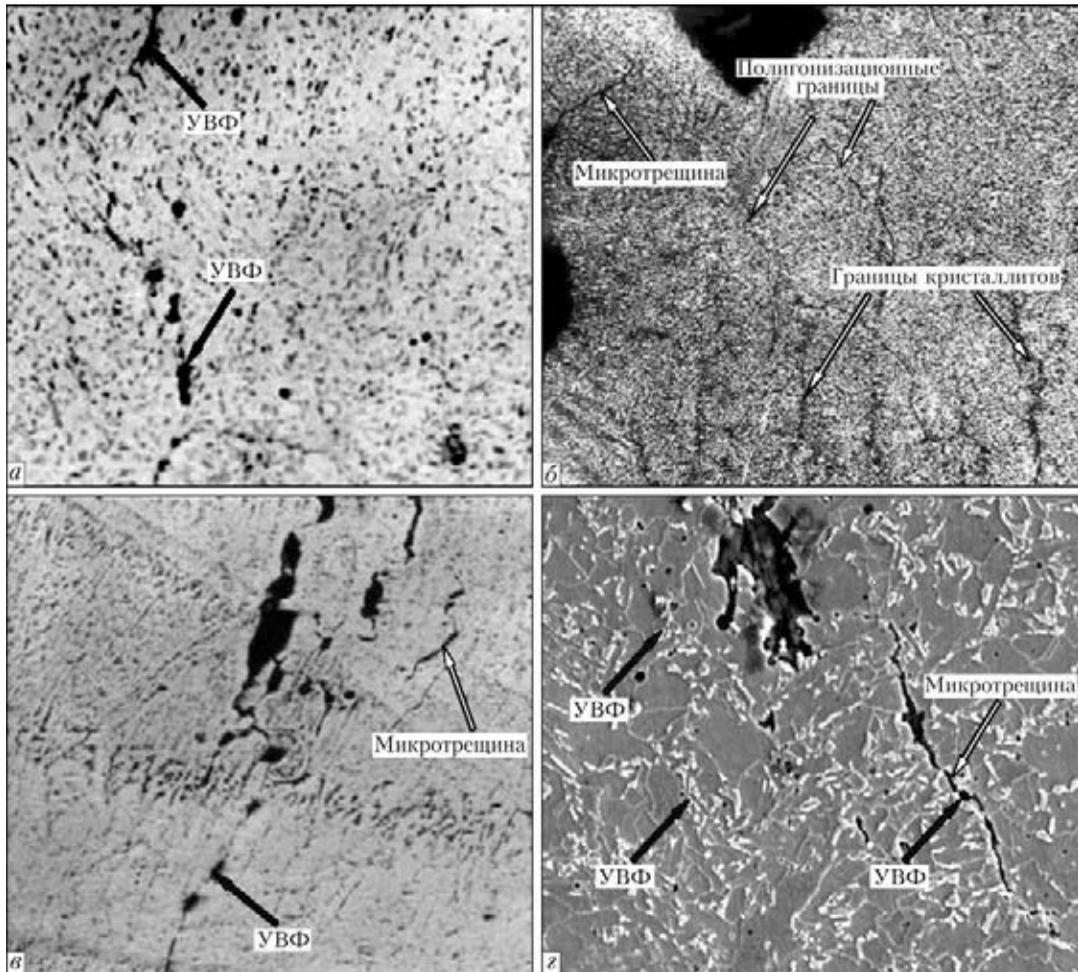


Рис. 6. Трещины в металле ремонтных швов: *а* — травление в горячем растворе пикрата натрия,  $\times 500$ ; *б, в* — травление в насыщенном водном растворе пикриновой кислоты, соответственно  $\times 50, 200$ ; *г* — травление в 4 % спиртовом растворе азотной кислоты,  $\times 400$ ; *а-в* — оптическая; *г* — растровая электронная металлография

**Таблица 3. Ударная вязкость металла многопроходного ремонтного шва при использовании различных сварочных материалов**

Способ сварки	Номер варианта	Сварочные материалы	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
			-20 °C	-40 °C
Ручная дуговая	1	Schwarz 3K	$\frac{65,5...107,0}{81,0}$	$\frac{40,3...61,2}{48,8}$
Механизированная в защитном газе	2	CO <sub>2</sub> , Св-08Г2С	$\frac{27,6...34,3}{30,8}$	—
	3	Ar + 20 % CO <sub>2</sub> , Св-08Г2С	$\frac{34,9...48,6}{42,9}$	—
	4	Ar + 20 % CO <sub>2</sub> G MoSi	$\frac{74,5...124,4}{93,2}$	$\frac{31,8...63,8}{53,1}$
Механизированная под флюсом	5*	АН-60, Св-10Г2	$\frac{21,2...29,6}{25,0}$	—
	13*	АН-60, Св-08ХМ	$\frac{29,8...35,4}{32,2}$	—
	16*	OK 10.74, S2Mo	$\frac{65,9...75,8}{70,3}$	$\frac{37,7...42,4}{40,8}$
	17*	OK 10.74, Св-08ГМ	$\frac{77,8...109,8}{90,7}$	—

Примечание. Номера вариантов сварочных материалов даны согласно табл. 2.

ударный изгиб подтверждают также эффективность легирования металла многопроходных ремонтных швов указанными элементами с целью повышения его вязких свойств (табл. 3). Так, применение проволоки с молибденом при сварке ремонтных швов в смеси Ar + 20 % CO<sub>2</sub> (проволока G MoSi) и под агломерированным алюминатно-основным флюсом типа ОК 10.74 (проволока S2Mo и Св-08ГМ), как и ожидалось, позволило получить относительно высокие значения KCV при температуре -20 °C (в среднем более 70 Дж/см<sup>2</sup>) и -40 °C (в среднем более 40 Дж/см<sup>2</sup>). Однако структура металла последних проходов таких ремонтных швов, с точки зрения устранения опасности образования холодных трещин, осталась неприемлемой.

Результаты проведенных испытаний позволили сформулировать требования к химическому составу сварочной проволоки для исправления дефектов в швах труб с помощью многопроходной сварки.

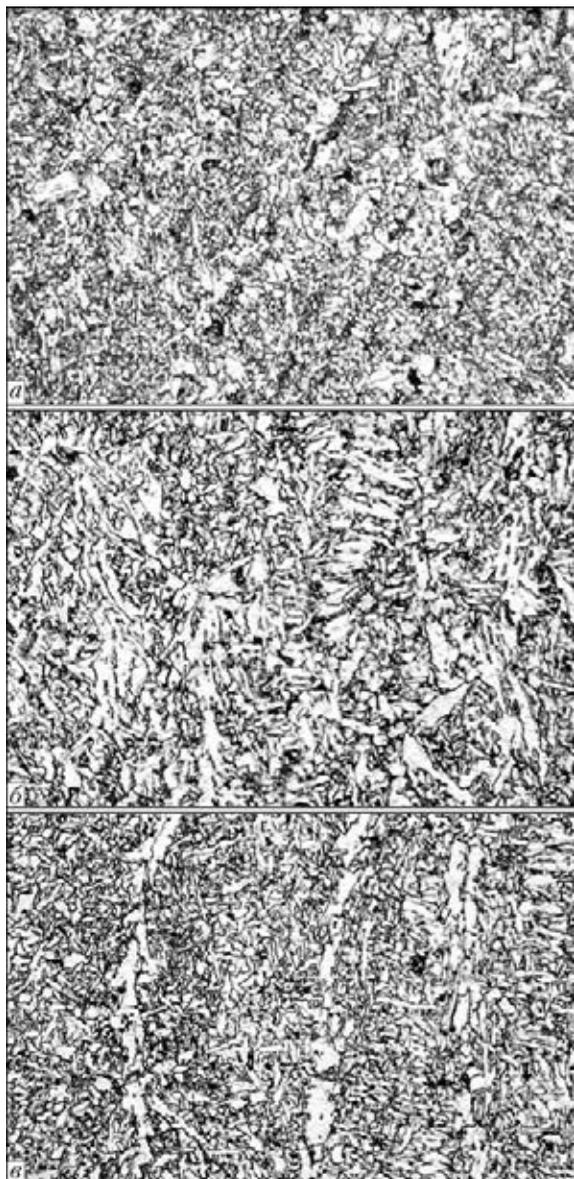


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла различных проходов ремонтного шва, выполненного механизированной сваркой в смеси защитных газов  $Ar + 20\% CO_2$  проволокой NiMo1-1G с ограниченным содержанием молибдена: а, б — промежуточные соответственно 2-3 и 5-6 проходы; в — последние проходы

Такая проволока должна содержать ограниченное количество марганца, кремния, а дополнительное легирование ее молибденом должно обеспечивать его присутствие в металле последних проходов многослойного ремонтного шва в количестве не более 0,30 %. При сварке под флюсом рекомендуемую проволоку следует применять в сочетании с флюсом, например, алюминатным, исключая чрезмерное обогащение металла многопроходного ремонтного шва марганцем и кремнием. Проволоку NiMo1-1G, химический состав которой следующий, мас. %: 0,081 С, 1,7 Мн, 0,57

Таблица 4. Химический состав металла ремонтных швов при сварке в смеси  $Ar + 20\% CO_2$  проволокой NiMo1-1G, мас. %

Зона контроля	С	Мн	Si	Ni	Mo	Ti	V
Первые проходы	0,08	1,35	0,37	0,87	0,24	0,025	0,05
Закрывающие проходы	0,08	1,36	0,40	0,87	0,26	0,022	0,04

Si, 0,88 Ni, 0,04 V, 0,29 Mo, 0,056 Ti, 0,014 S, 0,017 P, испытывали при многопроходной (количество проходов — восемь) сварке в смеси  $Ar + 20\% CO_2$ , имитирующей исправление дефекта с предварительным его удалением в продольном шве трубы из стали X70 с толщиной стенки 18,7 мм. Применяемая проволока была дополнительно легирована небольшим количеством никеля. Данные спектрального анализа, приведенные в табл. 4, подтвердили достаточную стабильность химического состава ремонтных швов. Содержание основных легирующих элементов (марганца, кремния, никеля, молибдена, титана) в металле первых и замыкающих проходов практически не изменилось, при этом оно не превышало рекомендуемых значений.

При испытании на ударный изгиб образцов с острым надрезом металл ремонтных швов, выполненных данной проволокой, характеризовался высокими значениями ударной вязкости при температуре  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  (170,4...199,8 Дж/см<sup>2</sup>),  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  (140,9...170,2 Дж/см<sup>2</sup>) и  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  (67,8...136,2 Дж/см<sup>2</sup>). В то же время в металле такого шва, в том числе его последних проходов, формируется достаточно дисперсная структура игольчатого феррита при отсутствии полигонизационных границ и участков с грубыми зернограницными образованиями фаз с повышенным содержанием углерода: МАК-фаза, карбиды (рис. 7).

Результаты исследований могут быть использованы также при многослойной сварке других металлоконструкций.

1. *ДСТУ ISO 3183-2:2006*. Нафтогазова промисловість. Труби сталеві для трубопроводів. Технічні умови постачання. Частина 2. Труби класу вимог В.
2. *ANSI/API Specification 5L*. Specification for line pipes, ISO 3183:2007. Petroleum and natural gas industries, steel pipe for pipelines. Technical delivery conditions. — 2007. — 167 p.
3. *DNV Offshore Standart DNV-OS-F101*. Submarine pipeline systems. Det Norske Veritas. — 2007. — 240 p.
4. Рыбаков А. А., Филичук Т. Н., Гончаренко Л. В. Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра и меры их предупреждения // Автомат. сварка. — 2013. — № 4. — С. 16–22.
5. *Повышение ударной вязкости металла швов труб большого диаметра из микролегированных сталей* / С. Л. Мандельберг, Ю. Л. Богачек, В. А. Ковалевский, В. С. Токарев // Там же. — 1986. — № 1. — С. 36–40.

Поступила в редакцию 11.07.2013



# ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

**В. В. ЧИГАРЕВ<sup>1</sup>, И. В. КОВАЛЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Призов. гос. техн. ун-т. 87500, г. Мариуполь, пер. Университетский, 7. E-mail: chigarew@pstu.edu

<sup>2</sup> ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича.  
87504, г. Мариуполь, ул. Левченко, 20. ЦМК-2. E-mail: oksikov19@mail.ru

Основной целью настоящих исследований является определение влияния остаточных напряжений в околошовной зоне плакирующего слоя двухслойной стали ВСт3+10Х13 на ее эксплуатационные свойства. Задача, стоящая перед авторами, — сравнить теоретические и экспериментальные значения остаточных напряжений в сварных образцах двухслойных сталей ВСт3+08Х13, ВСт3+10Х13, ВСт3+10Х17Н13М2Т и определить материал, наиболее подходящий для дальнейшей эксплуатации. Для выявления уровня остаточных напряжений плакирующего слоя использованы малоцикловое одноосное нагружение образцов, математические расчеты. Результаты измерений остаточных напряжений, которые проводили с помощью тензодатчиков, и сравнение их значений с теоретическими позволяют утверждать, что установленное значение остаточных напряжений в околошовной зоне соединения ВСт3+10Х13, равное 100 МПа, свидетельствует о наличии запаса эксплуатационной надежности соединений. По этой причине биметаллические стали, описанные в данной работе, пригодны для изготовления крупных металлургических агрегатов. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* дуговая сварка биметаллов, остаточные напряжения, плакирующий слой, околошовная зона, модуль упругости, тензодатчик, деформация слоя, эксплуатационные свойства

Постоянный рост требований к качеству изготовления металлургических агрегатов, выполнению их ремонта с применением технологии сварки двухслойной стали обуславливают появление новых методов расчета и определения эксплуатационных свойств. Особую роль играет прогноз относительно длительности эксплуатации металлоконструкций. В связи с этим разработки в указанном направлении достаточно актуальны.

Двухслойные стали ВСт3+10Х13 широко применяются как коррозионно- и термостойкие материалы при изготовлении деталей, работающих в воде, разбавленных растворах солей, агрессивных термических средах, в нефтехимической промышленности [1]. Так, значения скорости общей коррозии со стороны плакирующего слоя составляют 0,1...0,3 мм/год.

Проведение исследований, направленных на определение работоспособности сварных соединений двухслойных сталей, имеет важное значение, поскольку данные материалы применяют как при изготовлении, так и при ремонте промышленных агрегатов.

Согласно данным работы [2] из-за увеличения уровня остаточных напряжений и образования неоднородностей в структуре соединений при сварке двухслойных сталей значения ударной вязкости

снижаются на 20...25 % по сравнению с исходным состоянием. Кроме того, вблизи сварных соединений могут возникать дефекты, вызванные пластической деформацией укорочения [3]. Склонность сварных соединений к образованию таких дефектов тем больше, чем меньше деформационная способность.

Цель настоящей работы — определение остаточных напряжений околошовной зоны двухслойной стали ВСт3сп+10Х13, изучение и анализ закономерностей распределения напряжений в сварном соединении.

Для проведения исследований были использованы пластины размером 20×100×600 мм из двухслойной стали марки ВСт3сп+10Х13, поставляемой по ТУ 14-1-1670-86.

Сварку пластин, предназначенных для испытаний, производили по технологии, разработанной фирмой подрядчиком ООО «Промтехмонтаж» сварочным автоматом АДФ-1002 типа 2ТС-17С. Сварку выполняли в два прохода: первый проход основной слой (сталь ВСт3сп) на режиме:  $I_{св} = 520...570$  А;  $U_{д} = 38...40$  В;  $v_{св} = 22$  м/ч, флюс АН-348А, проволока Св-08А. Разделка кромок пластин как для основного слоя, так и для вспомогательного V-образная.

Сварку разделительного (переходного) слоя выполняли за один проход, после сварки основ-

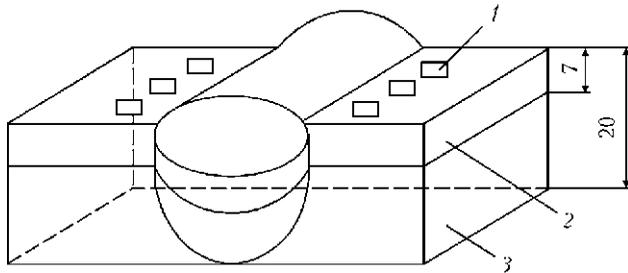


Рис. 1. Сечение сварного образца двухслойной стали для проведения исследований: 1 — тензодатчик; 2 — плакирующий слой; 3 — основной металл

ного слоя на режиме:  $I_{св} = 280...300$  А;  $U_{д} = 23...25$  В;  $v_{св} = 18...20$  м/ч, флюс АН-45, проволока Св-10Х16Н25М6.

Для сварки плакирующего слоя 10Х13 применяли следующие режимы:  $I_{св} = 330...350$  А;  $U_{д} = 24...28$  В;  $v_{св} = 18...20$  м/ч, флюс АН-18, проволока Св-10Х16Н25М6.

Измерения остаточных напряжений производили на сварных образцах после одного цикла нагружения  $20 \cdot 10^3$  колебаний [3]. Исследовали сварные соединения следующих композиций: ВСт3сп+08Х13, ВСт3сп+10Х13, ВСт3сп+10Х17Н13М2Т. Рабочее давление при нагружении образца составляло 1210 МПа, значение деформации на поверхности образца  $\epsilon_{ср} = 0,0031$ . Основная цель проведения данных испытаний — измерение фактических остаточных напряжений сварных образцов (рис. 1).

В качестве одного из критериев оценки эксплуатационной надежности сварного соединения из двухслойной стали был определен уровень остаточных напряжений. Состояние образцов и усреднение значения пределов текучести основного и плакирующего слоев приведены в таблице.

Напряжение  $\sigma_a$  в образце на расстоянии  $Q$  от поверхности определяли по следующей формуле:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} E (h - a) \frac{d\epsilon}{d\delta} (a) - 3E(h - a) \int_0^a \frac{\epsilon(\delta)}{(h - a)^2} d\delta, \quad (1)$$

где  $a$  — толщина всех снятых слоев;  $h$  — общая толщина образца;  $E$  — модуль упругости;  $\delta$  — толщина снимаемого слоя;  $\epsilon(a)$ ,  $\epsilon(\delta)$  — деформация на нижней поверхности образца при удалении соответственно слоя толщиной  $a$  и  $\delta$ .

В проводимых исследованиях учтена толщина снимаемого слоя  $\Delta_i$  (мм), общая толщина всех снятых слоев  $\alpha_i$  (мм), деформация, замеренная

**Усредненные показатели свойств исследуемых сталей**

Номер образца	Состав композиции	$\sigma_{0,2}^{OM}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ПС}$ , МПа
12-9	ВСт3сп+08Х13	260	450
16-9	ВСт3сп+10Х17Н13М2Т	260	490
2С-3	ВСт3сп+10Х13	260	460

тензодатчиком сопротивления,  $\epsilon(\alpha_i) = \epsilon_i$ . Для вычисления производных использовали параболическую аппроксимацию:

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon}{d\alpha}(0) &= \epsilon_1 \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_1 \Delta_2} \right) + \epsilon_2 \left[ \frac{-\Delta_1}{\Delta_2(\Delta_1 + \Delta_2)} \right] = \epsilon_1 K_0^{(2)} + \epsilon_2 K_0^{(3)}, \\ \frac{d\epsilon}{d\alpha}(\alpha_1) &= \epsilon_{i-1} \left[ \frac{-\Delta_{i+1}}{\Delta_1(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right] + \epsilon_i \left( \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i \Delta_{i+1}} \right) + \\ &+ \epsilon_{i+1} \left[ \frac{\Delta_i}{\Delta_{i+1}(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right] = \epsilon_{i-1} K_i^{(1)} + \epsilon_i K_i^{(2)} + \epsilon_{i+1} K_i^{(3)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значения коэффициентов  $K^{(1)}$ ,  $K^{(2)}$ ,  $K^{(3)}$  приведены в табл. 3.7 работы [4]. Там же в подынтегральном выражении указываются полусуммы и значения интеграла. Значение остаточного напряжения  $\sigma(\alpha_i)$  (сумма значений в последних трех столбцах) приведено также в работе [4]. По результатам расчета построены эпюры распределения остаточных напряжений по сечению плакирующего слоя (рис. 2).

В представленном материале делается акцент на то, что остаточные напряжения, возникающие на различных стадиях технологического процесса изготовления конструкционных металлургических узлов и элементов, часто оказывают значительное влияние на статическую и усталостную прочность конструкций. Поэтому точный учет и анализ фактического распределения остаточных напряжений может открыть новые возможности безопасной эксплуатации металлургических узлов и агрегатов.

Как видим из рис. 2, у эпюр распределение остаточных напряжений для образцов, не подверженных нагружению, во всех исследуемых композициях в плакирующем слое имеются остаточные напряжения растяжения. Характер распределения напряжений по сечению плакирующего слоя примерно одинаков [2] для всех образцов: постепенное увеличение от линии сплавления слоев до максимального значения на глубине 0,2...0,8 мм от свободной поверхности плакирующего слоя. По мере приближения к поверхности плакирующего слоя значение напряжений уменьшается.

Максимальные значения остаточных напряжений для композиции ВСт3сп+12Х13 составляют около 200 МПа, а для композиции ВСт3сп+10Х13 — около 140 МПа. Следует обратить внимание на то, что наличие остаточных напряжений растяжения в плакирующем слое может повлиять на длительность эксплуатации образца и будущей металлоконструкции в целом, особенно, когда оба слоя композиции подвержены нагружению в пределах упругой области. Эти доводы являются решающими при выборе материала плакирующего слоя (рис. 3).

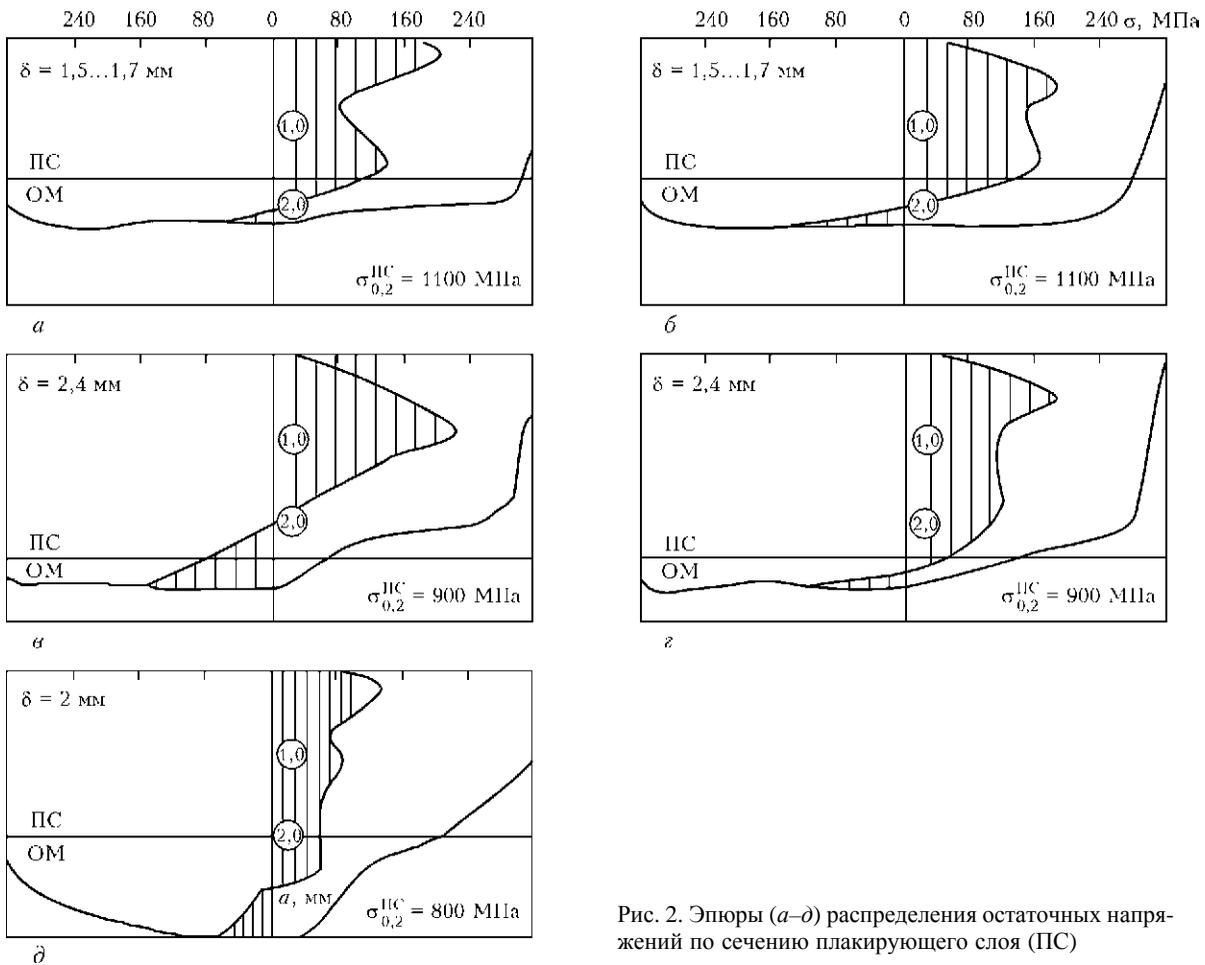


Рис. 2. Эпюры (а–д) распределения остаточных напряжений по сечению плакирующего слоя (ПС)

Экспериментальные и расчетные данные остаточных напряжений в плакирующем слое после нагружения образца, когда  $\varepsilon_{0,2}^{ПС} < \varepsilon_{ср} < 2\varepsilon_0^{ОМ}$  свидетельствуют о наличии остаточных напряжений сжатия, причем их максимальное значение различное и зависит от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя. Так, в образце 14-10 (ВСтЗсп+08Х13), предварительно нагруженном до  $\sigma_{ср} = 900$  МПа, максимальное значение остаточных напряжений сжатия составляет 100 МПа, а в образце 12-19 (ВСтЗсп+08Х13), нагруженном  $\sigma_{ср} = 1050$ , — 200 МПа. Представляет интерес рассмотрение эпюры образца 13-1 (ВСтЗсп+10Х17Н13М2Т), у которого предел текучести материала плакирующего слоя составляет

270 МПа. Как видно, напряжения распределяются с равномерным уменьшением от максимума на поверхности до линии сплавления, после пересечения которой меняется их знак. Следует обратить внимание на тот факт, что в этом образце максимальное значение остаточных напряжений наибольшее по сравнению с аналогичными значениями для других образцов и соответствует напряжениям предела текучести материала плакирующего слоя [5]. Это, видимо, связано с тем, что рабочие деформации образца значительно превосходят деформации предела текучести материала

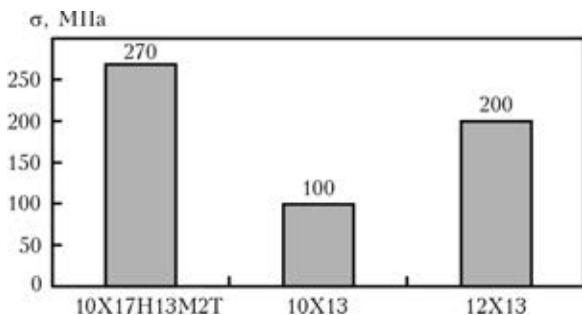


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений в околошовной зоне от материала плакирующего слоя

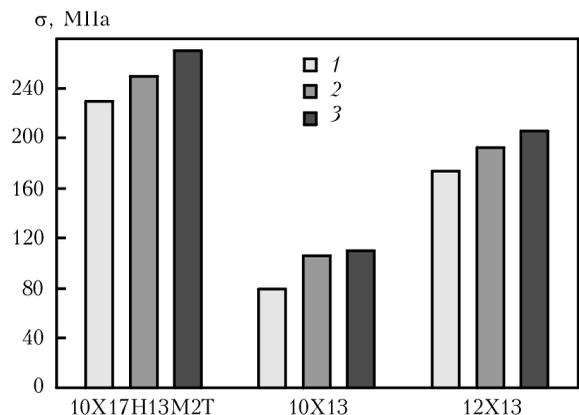


Рис. 4. Влияние толщины плакирующего слоя на остаточные напряжения в околошовной зоне: 1 —  $\delta = 5$  мм; 2 — 7; 3 — 10

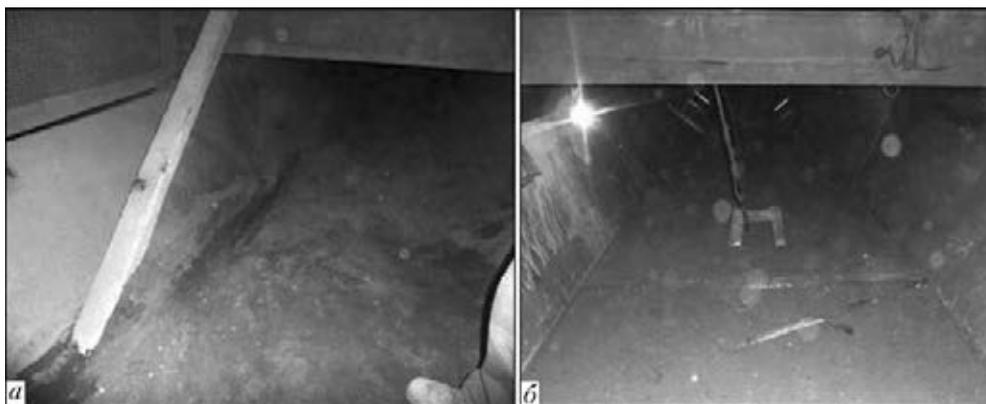


Рис. 5. Желоб скреперного механизма до ремонта (а) и после восстановления (б)

плакирующего слоя, т. е. соблюдается условие, когда  $\varepsilon_{\text{ср}} > \varepsilon_{0,2}^{\text{ПС}}$ . В этом случае остаточные напряжения сжатия могут быть равны напряжениям предела текучести материала плакирующего слоя, поскольку последний подвержен упругопластическому деформированию как при нагружении, так и при сбросе рабочей нагрузки.

В ходе проводимых исследований учитывалось значение продольных остаточных напряжений, как правило, растягивающих, которые являются следствием выбора толщины плакирующего слоя (рис. 4). Следует также отметить, что на зависимость, приведенную на рис. 4, оказывают влияние различные степени пластической деформации при сварке, нагрев и охлаждение [6]. На основе анализа эпюр остаточных напряжений  $\sigma_{\text{ср}}$  в образцах при сварке автоматом АДФ-1002 типа 2ТС-17С можно выделить следующие особенности: зона сжимающих напряжений предопределяет поведение и свойства металла так, что толщина плакирующего слоя прямо пропорциональна значению остаточных напряжений в плакирующем слое всех исследуемых образцов.

В результате внедрения разработанной технологии сварки желоба скреперного механизма агломашины, разработанной подрядной организацией, получена конструкция металлургического агрегата, способного выдерживать высокие заданные нагрузки и длительный период эксплуатации, а также подтверждена целесообразность применения биметалла ВСтЗсп+10Х13 в качестве основного материала.

Таким образом, результаты проведенных работ свидетельствуют о том, что для обеспечения гарантированного качественного соединения рас-

смотренных биметаллов возможно применение описанной выше технологии. В этом случае срок эксплуатации можно увеличить до 80 %.

### Выводы

1. Установленное значение остаточных напряжений в околошовной зоне соединения ВСтЗсп+08Х13, равное 100 МПа, является наилучшим показателем среди исследуемых сталей с наличием остаточных напряжений сжатия, причем их максимальное значение различное и зависит от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя.

2. В результате применения биметалла ВСтЗсп+08Х13 в качестве основного материала при изготовлении желоба скреперного механизма взамен металла ВСтЗсп, гарантировано увеличение периода эксплуатации до 80 %.

1. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. — М.: Машгиз, 1958. — 258 с.
2. Гликман Л. А., Бабаев А. Н., Костров Е. Н. Усталостная прочность и напряженность сварных образцов с наплавленным слоем 10Х13 // Свойства материалов, применяемых в турбостроении и методы их испытаний. — М.-Л.: Машгиз, 1962. — С. 138–151.
3. Недосека А. Я. Основы расчета сварных конструкций. — Киев: Вища шк., 1988. — 263 с.
4. Коваленко И. В. Усовершенствование технологии дуговой сварки двуслойных сталей при изготовлении промышленных металлоконструкций: Дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 2013. — 146 с.
5. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. — М.: Высш. шк., 1982. — 270 с.
6. Стафаков Ю. П., Побаль И. Л., Князева А. Г. Рост трещин вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия // Физ. мезомеханика. — 2002. — № 1. — С. 81–88.

Поступила в редакцию 25.01.2013

## ШЕСТЬДЕСЯТ ЛЕТ ЦЕЛЬНОСВАРНОМУ МОСТУ им. Е. О. ПАТОНА

Л. М. ЛОБАНОВ, В. И. КИРЬЯН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Вопрос о постройке в Киеве автодорожного моста через р. Днепр был поднят перед Великой Отечественной войной. Тогда же был составлен и утвержден технический проект моста с ездой поверху и разрезными сквозными главными фермами, изготавливаемыми с помощью клепки. В этот период в Институте электросварки АН УССР был разработан способ автоматической сварки под флюсом, позволяющий получать высококачественные швы, и Е. О. Патон предложил изготавливать пролетные строения моста с помощью сварки. Несмотря на мнение оппонентов, инициатива Е. О. Патона была поддержана Правительством СССР и было принято решение о сооружении киевского моста сварным с клепаными монтажными соединениями. Для осуществления проекта были изготовлены опоры в 1940–1941 гг. и на заводе металлоконструкций в Днепропетровске началось производство монтажных элементов пролетных строений с помощью автоматической сварки под флюсом. Однако строительство моста было прервано из-за войны, но после ее окончания было возобновлено. Поскольку к тому времени были созданы аппаратура и технологии, обеспечивающие высокое качество и монтажных швов, Е. О. Патон предложил строить в Киеве цельносварной мост через р. Днепр с применением автоматической сварки не только в заводских условиях, но и на монтаже. Цельносварной киевский мост через р. Днепр сооружали в тесном содружестве Киевское отделение ГПИ «Проектстальконструкция», завод металлоконструкций (г. Днепропетровск), Мостоотряд № 2 Министерства путей сообщения, Институт электросварки им. Е. О. Патона АН УССР и Министерство коммунального хозяйства УССР. Библиогр. 3, рис. 16.

*Ключевые слова: автоматическая сварка под флюсом, цельносварной мост, пролетные строения, монтажные элементы, строительство, содружество организаций*

В начале 1930-х годов в судостроении, промышленном строительстве, транспортном, подъемно-транспортном машиностроении и других отраслях промышленности вместо клепки стали широко применять сварку. Это позволило внести многие новшества и упрощения, сокращающие объем потребляемого металла и трудоемкость изготовления конструкций. Однако переход с клепки на сварку был достаточно сложным, особенно при изготовлении крупногабаритных металлоконструкций и в первую очередь пролетных строений мостов, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур и сложного переменного нагружения.

Из Западной Европы приходила тревожная информация о серьезных проблемах со сварными мостами. Стоит упомянуть широко известные случаи разрушений сварных мостов в Германии и Бельгии. Этого было вполне достаточно для формирования негативного отношения по поводу применения сварки в мостостроении.

В этот период в Лаборатории электросварки при Всеукраинской академии наук (Киев), преобразованной в 1934 г. в Институт электросварки АН УССР, начали целенаправленно изучать несущую способность сварных соединений и конструкций. В этой лаборатории, организованной и возглавляемой академиком Е. О. Патонем, пер-

воначально экспериментальные исследования проводили путем сопоставления результатов испытаний идентичных сварных и клепаных соединений образцов, балок и целых конструкций при статическом, переменном и ударном нагружении. Проведенные испытания позволили получить наиболее наглядные и убедительные доказательства прочности сварных соединений и преимуществ технологии сварки. В этих и других сравнительных испытаниях сварные соединения разрушались от усталости не по металлу швов, а по основному металлу в зоне соединения. Стало очевидным, что основной причиной их разрушения является концентрация напряжений, создаваемая формой соединения и швов или же технологическими дефектами сварки.

Предполагалось также, что недостаточная прочность и вязкость металла шва, его меньшая однородность, чем основного металла, будут понижать сопротивление конструкций усталостным разрушениям. В этот период велись работы по изысканию рациональных конструктивных и технологических решений, обеспечивающих заданную циклическую долговечность сварных соединений и узлов. Исследования главным образом относились к мостам, вагонам и кранам. Они убедительно показали, что сварные соединения и узлы можно обоснованно применять в ответственных конструкциях, воспринимающих воздействие



переменных напряжений. Была доказана равнопрочность стыковых соединений со снятым «усилением швов» и основного металла при переменных нагрузках.

Вопрос о строительстве в Киеве автодорожного моста через р. Днепр был поднят перед Великой Отечественной войной. Тогда же был составлен и утвержден технический проект моста с ездой поверху и разрезными сквозными главными фермами, перекрывающими пролеты длиной 58 м (в пойменной части) и 87 м (в судоходной). Поскольку в этот период в Институте электросварки АН УССР был разработан способ автоматической сварки под флюсом, позволяющий получать высококачественные швы, Е. О. Патон предложил изготавливать пролетные строения моста с помощью сварки. И тут подняли головы оппоненты применения сварки в мостостроении. На совещании они ратовали за широко используемую в то время технологию клепки мостов, а в подтверждение представили фотографии из зарубежных журналов с разрушенными пролетными строениями, при строительстве которых применяли сварку.

Евгений Оскарович, основываясь на результатах первых глубоких исследований процесса сварки, да и на интуиции, был твердо убежден, что причина катастроф за рубежом кроется не в основных принципах процесса сварки, а в неправильном, кустарном ее применении. Проектировщики оставляли без изменения конструкцию мостов, принятую при клепке, т. е. не учитывали особенностей процесса соединения элементов с помощью сварки. Кроме того, применяемая сталь для клепки оказалась совершенно непригодной для сварки, а качество швов при используемой тогда ручной сварке было катастрофически низким.

После кратко изложения Е. О. Патонем принципов строительства сварного моста в Киеве через р. Днепр, включающих выбор стали, пригодной для сварки, применение автоматической сварки под флюсом и жесткий контроль качества сварных соединений, секретарь ЦК Н. С. Хрущев попыток: «Мост будем варить. Да, варить! Неудачи других стран — нам не указ».

Только благодаря высокому авторитету Евгения Оскаровича Патона и его инженерной смелости удалось добиться положительного решения директивных органов. Инициатива Е. О. Патона была поддержана Правительством СССР, в результате чего было принято решение о сооружении киевского моста сварным с клепаными монтажными соединениями, в соответствии с которыми были внесены необходимые изменения в проект.

Для осуществления проекта были изготовлены опоры, и перед самой Великой Отечественной войной на заводе металлоконструкций (ЗМК) в Днепропетровске началось изготовление монтаж-

ных элементов пролетных строений с помощью автоматической сварки под флюсом. Война прервала строительство моста.

В 1946 г., предвидя большие перспективы изготовления пролетных строений мостов с помощью сварки, Евгений Оскарович Патон — признанный лидер в области сварки и мостостроения — обратился с предложением в Правительство СССР о внедрении сварки в мостостроение, которое поддержало его инициативу и издало специальное постановление по этому вопросу. Во исполнение постановления правительства Евгений Оскарович объединил и организовал совместную работу проектировщиков мостов и сотрудников Института электросварки. Они провели большой комплекс исследований и проектно-конструкторских разработок с целью развития основных принципов проектирования сварных мостов, изложенных Е. О. Патонем еще в 1933 г. [1]. В результате этой большой работы были решены главные вопросы, открывающие широкие возможности применения сварки в мостостроении. Они детально изложены в работе [2] и касались усовершенствования конструкции моста, его узлов и применяемой стали. Принципиальным было создание соответствующей аппаратуры и технологии, обеспечивающих высокое качество как заводских, так и монтажных швов [3].

Полученные результаты позволили Е. О. Патону поставить вопрос о строительстве в Киеве цельносварного моста через р. Днепр с применением автоматической сварки не только в заводских условиях, но и на монтаже. Предложение Е. О. Патона, поддержанное Правительством СССР, было принято, и в технический проект, а позднее в рабочие проекты были внесены соответствующие изменения, учитывавшие результаты последних исследований Института электросварки, а также конструктивные усовершенствования, согласно утвержденному Постановлением Совета Министров УССР от 17 мая 1948 г. проектному заданию, которые касались следующих положений:

фермы моста сварные со сплошной стенкой, высотой не более 3,6 м;

сохранение по всей длине моста существующего типа опор с ригелями на колоннах;

в судоходных пролетах применять фермы со сплошными вутами.

Все эти и другие разработки Института электросварки им. Е. О. Патона послужили научной основой проектирования, изготовления и строительства первого самого крупного в Европе цельносварного моста (рис. 1). Заводское изготовление металлоконструкций моста общей массой около 10 тыс. т осуществляли с декабря 1951 г. по апрель 1953 г., а монтажные работы — с апреля 1952 г. по октябрь 1953 г. Общая длина моста



Рис. 1. Цельносварной мост им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве



Рис. 2. Общий вид траверсы кондуктора для сборки и сварки крупногабаритных монтажных элементов в цеху ЗМК

составляет 1543 м. Он имеет 24 пролета — 20 по 58 м, а четыре судоходных — по 87 м. В поперечном сечении пролетное строение имеет четыре двутавровые главные балки со сплошной стенкой, расположенные друг от друга на расстоянии 7,6 м, которые объединены между собой поперечными связями. Продольные связи имеются только по нижнему поясу между средними главными балками по всей длине моста. Над опо-

рами продольные связи устанавливали между всеми четырьмя главными балками. Верхние пояса объединены поперечными прокатными балками с включенной в их работу на изгиб железобетонной плитой проезжей части. Ширина моста 27 м (проезжая часть 21 м, два тротуара по 3 м).

Осуществление строительства моста было возложено на Министерство коммунального хозяйства УССР, которое организовало Специальное управление строительства моста.

Строительство киевского моста через р. Днепр в тесном содружестве проводили коллективы Киевского отделения ГПИ «Проектстальконструкция», завода металлоконструкций (г. Днепропетровск), Мостоотряда № 2 Министерства путей сообщения, Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР и Министерства коммунального хозяйства УССР.

ЗМК в Днепропетровске выделил и оборудовал специальный цех для производства крупных блоков и наладил поточное изготовление монтажных элементов (рис. 2–4). Сварочные работы проводили круглый год рабочие Мостоотряда № 2, обученные и инструктируемые специалистами Института электросварки (рис. 5–9). Контроль,



Рис. 3. Процесс сборки ферм в кондукторе

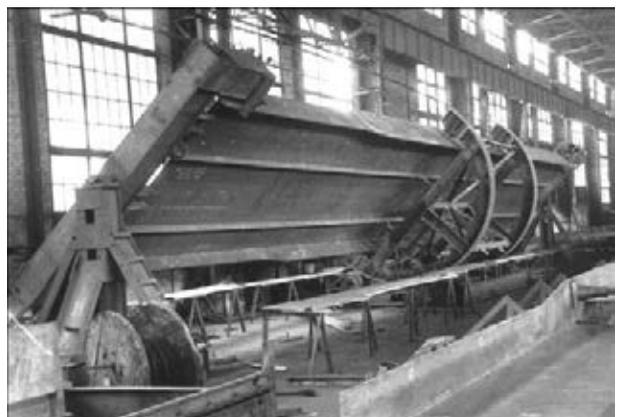


Рис. 4. Длинная балка в кантователе



Рис. 5. Сварка трактором ТС-17-М стыкового шва стенки

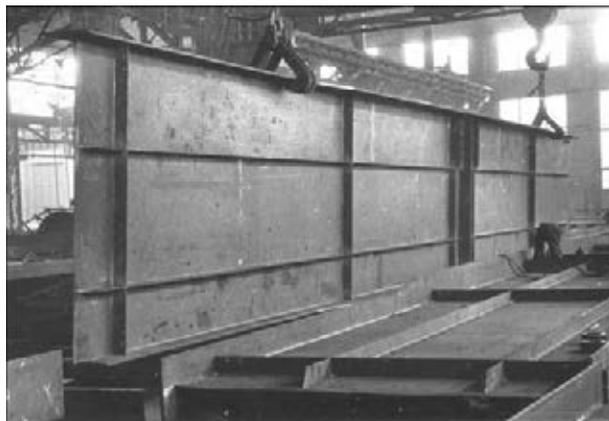


Рис. 8. Приварка торцов ребер жесткости



Рис. 6. Приварка ребра жесткости полуавтоматом ПШ-5 с держателем ДШ-27



Рис. 9. Сварка поясных швов вута в кондукторе



Рис. 7. Процесс сварки продольных стыков трактором ТС-17-М в кантователе

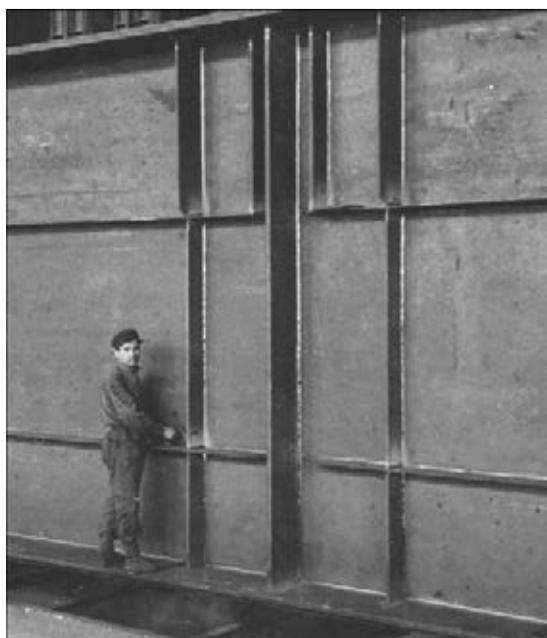


Рис. 10. Осмотр швов

наблюдение и приемку сварочных работ осуществляла инспекция, организованная и подчиненная Институту электросварки (рис. 10).

Доставку готовых монтажных элементов моста в Киев осуществляли железнодорожным транспортом (рис. 11, 12). Сварку монтажных стыков, как и заводскую, производили автоматами (рис. 13, 14).

Киевский сварной автодорожный мост им. Е. О. Патона по ряду своих характерных особенностей является уникальным не только в нашей стране, но и во всем мире. Его уникальность в том, что:

все соединения в пролетных строениях моста выполнены на заводе и монтаже с помощью сварки, т. е. мост является цельносварным. Если принять во внимание, что он имеет общую длину 1543 м и что на пролетные строения израсходовано около 10 тыс. т стали, а общая протяженность сварных швов — 10668 м, то можно утверждать,



Рис. 11. Эшелон с главными балками на заводских путях



Рис. 12. Вут, погруженный на платформу

что он и на сегодня является самым большим цельносварным мостом в мире;

изготовление монтажных элементов на заводе и выполнение монтажных стыков осуществляли главным образом с помощью автоматической и полуавтоматической сварки. Ручную сварку применяли при выполнении менее ответственных элементов моста (связи, поперечные балки и пр.);

при проектировании моста был использован принцип крупноблочности, который позволил 97 % всех заводских швов главных ферм и 88 % всех монтажных швов главных ферм выполнять с помощью автоматической и полуавтоматической сварки. Кроме того, наличие крупных однотипных блоков позволило механизировать сборочно-сварочные операции и организовать поточный метод изготовления на заводе и монтаже, что повысило качество сварочных работ и снизило их трудоемкость.

Исключительная роль в строительстве этого моста принадлежит Е. О. Патону, который неустанно работал в течение ряда лет над проблемой сварного мостостроения и был инициатором постройки в Киеве цельносварного моста. До последних дней своей жизни Е. О. Патон пристально следил за его сооружением.

Мост был обследован лабораторией Московского автодорожного института как в процессе



Рис. 13. Сварка вертикального монтажного стыка автоматом А-314



Рис. 14. Общий вид сварного монтажного стыка в пролете

строительства, так и после его окончания. В завершение мост был испытан на статическую и динамическую нагрузки (рис. 15). Испытания дали положительные результаты.

4 ноября 1953 г. Правительственная комиссия произвела осмотр в натуре построенного автодорожного моста через р. Днепр в Киеве, ознако-



Рис. 15. Испытание моста



Рис. 16. Торжественное открытие моста 5 ноября 1953 г.

милась с технической документацией и постановила принять мост в постоянную эксплуатацию с 5 ноября 1953 г. с пропуском по нему всех видов нагрузок, предусмотренных проектом, без ограничения скорости. Основным работам по строительству моста Правительственная комиссия дала оценку «о т л и ч н о».

5 ноября 1953 г. Совет Министров УССР своим Постановлением за № 2348 утвердил акт Правительственной комиссии о принятии в постоянную эксплуатацию цельносварного автодорожного моста через р. Днепр в Киеве и открытие движения по мосту назначил на 5 ноября 1953 г. (рис. 16). Так завершился ответственный и наиболее сложный этап становления сварного мостостроения.

18 декабря 1953 г. Постановлением Совета Министров УССР за № 2644 вновь построенному мосту было присвоено имя Е. О. Патона.

В 1995 г. Американской ассоциацией сварщиков цельносварной мост в Киеве через р. Днепр включен в список выдающихся инженерных сооружений.

После 60 лет эксплуатации мост им. Е. О. Патона продолжает надежно работать при проектной нагрузке Н-10 и существенно возросшей интенсивности движения (80 тыс. автомобилей в сутки при проектном значении 10 тыс.).

1. Патон Е. О., Горбунов В. И. Принципы проектирования сварных мостов // Автоген. дело. — 1933. — № 4. — С. 2–5.
2. Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Шумицкий О. И. Пятьдесят лет мосту им. Е. О. Патона // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 14–22.
3. Применение автоматической сварки при строительстве большого городского цельносварного моста / Е. О. Патон, Д. П. Лебедь, Е. Н. Радзевич и др. — Киев: Изд-во АН УССР, 1954. — 57 с.

Поступила в редакцию 04.11.2013

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ И МОНИТОРИНГ РЕЖИМОВ — ВАЖНЫЕ ФАКТОРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ МЕТАЛЛА БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

С. Н. ЛИТВИНЕНКО<sup>1</sup>, К. П. ШАПОВАЛОВ<sup>1</sup>, И. С. САВЧЕНКО<sup>1</sup>, С. Н. КОСИНОВ<sup>1</sup>,  
К. А. ЮЩЕНКО<sup>2</sup>, И. И. ЛЫЧКО<sup>2</sup>, С. М. КОЗУЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Новокраматорский магнитостроительный завод». 84305, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Орджоникидзе, 4.

E-mail: shapovalov@nkmz.donetsk.ua

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На ПАО «НКМЗ» успешно эксплуатируется уникальная по своим техническим возможностям установка для ЭШС крупногабаритных деталей, позволяющая производить сварно-литые, прокатно-сварные и сварно-кованные стальные заготовки сечением стыка до 5000×6000 мм, весом более 100 т. Требуемое качество металлу сварного соединения обеспечивают благодаря строгой выдержке заданных параметров режима сварки на весь период выполнения шва без вынужденных остановок сварочного процесса. Это достигается высокой надежностью работы электрической схемы управления и приводов исполнительных органов установки, а также применением метода дублирования подачи в зону сварки электродных проволок. Установление выбранных параметров режима, управление и визуальный контроль процесса сварки осуществляют с двух центральных пультов, а также с помощью автоматизированной системы мониторинга режимов сварки. Система контроля представляет собой многофункциональный комплекс, в котором контроль параметров технологического процесса (сбор и обработка информации) осуществляется контроллером SIMATIC S7-300, а отображение параметров, регистрация и протоколирование накапливаемой информации — промышленным компьютером в панельном исполнении PC 670 и текстовыми панелями оператора OP 7. Программное обеспечение системы управления разработано с использованием пакета программ WinCC V5.1 фирмы «Siemens» и работает под управлением операционной системы Microsoft Windows. Библиогр. 3, рис. 6.

*Ключевые слова:* специализированная установка для сварки металла больших толщин, электрошлаковая сварка плавящимся мундштуком, системы управления, мониторинг режима сварки, дублирование подачи электродных проволок, надежность выполнения электрошлакового процесса

ПАО «НКМЗ» является ведущим лидером производства крупногабаритных стальных металлоконструкций агрегатов тяжелого машиностроения с применением электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком (ЭШС ПМ).

Новый этап в развитии техники и технологии ЭШС ПМ начался в 2002 г., когда на заводе была создана и пущена в эксплуатацию новая, уникальная по своим техническим возможностям, установка для ЭШС крупногабаритных деталей большой толщины [1], не имеющая аналогов в мировой практике сварочного производства. На ней можно производить сварно-литые, прокатно-сварные и сварно-кованные стальные заготовки сечением стыка до 5000×6000 мм, весом более 100 т. Она позволяет также выполнять ЭШС двух стыков сечением до 2000×6000 мм одновременно.

При сварке изделий со стыками больших размеров вынужденные остановки ЭШС, как правило, ведут к образованию в шве практически неисправимых дефектов, что ведет к большим материальным потерям и снижает эффективность

технологического сварочного процесса. Надежность ведения процесса ЭШС обеспечивается строгой выдержкой заданных параметров режима сварки на весь период выполнения шва без вынужденных остановок сварочного процесса на время, превышающее 1,5...3,0 мин [2].

Сварочное оборудование установки обеспечивает высокую надежность ведения процесса ЭШС ПМ с получением гарантированного качества электрошлаковых соединений, в первую очередь, за счет надежности электрической схемы управления и приводов исполнительных органов установки, а также применения метода дублирования подачи в зону сварки электродных проволок [3]. Дублирование осуществляют по схеме «36 рабочих + 36 резервных». Причем, рабочие и дублирующие проволоки подаются от независимых приводов. Суммарное количество одновременной подачи проволок может достигать 72 шт.

Сварочное оборудование установки включает два, независимых друг от друга, блока (левый и правый). Каждый блок укомплектован двенад-

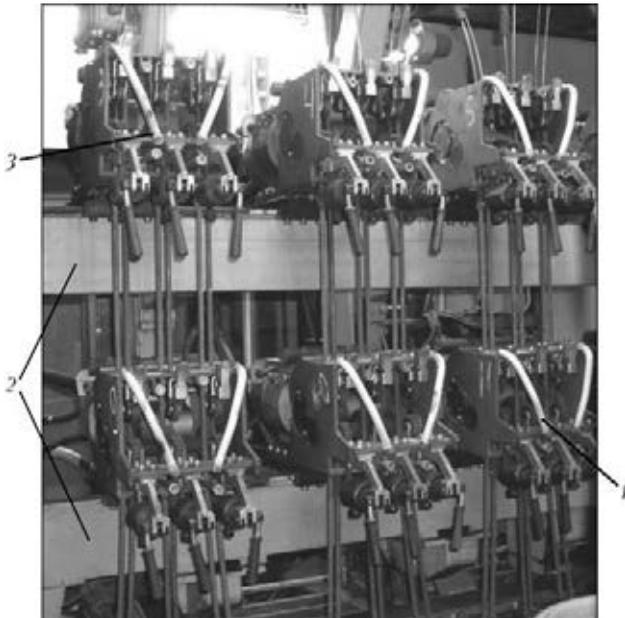


Рис. 1. Внешний вид сварочных аппаратов АШ-110, собранных в блоки: 1, 3 — рабочие и дублирующие сварочные аппараты соответственно; 2 — траверсы для крепления аппаратов

цатью трехэлектродными сварочными аппаратами АШ-110, собранными на траверсах таким образом (рис. 1), чтобы обеспечивать дублирование подачи сварочных проволок в направляющих каналах плавящихся мундштуков (рис. 2). Питание осуществляется от четырех источников питания типа ТШС 3000/3 (А-481 Е), подключенных параллельно (к каждому блоку по два). Установление выбранных параметров режима, управление и визуальный контроль процесса сварки осуществляются с помощью двух центральных пультов, а также автоматизированной системы мониторинга режимов сварки, размещенных в центральной кабине (рис. 3).

Для выполнения подготовительных и наладочных работ (перед сваркой и после) используют локальные пульты управления, расположенные по месту выполнения тех или иных подготовительных операций. Электрические системы управления и приводы всех элементов установки смонтированы в шкафах управления, размещенных на ее портале.



Рис. 2. Схема плавящихся мундштуков с каналами для подачи проволоки (вариант на одну фазу): 1, 2 — каналы для перемещения сварочных проволок рабочих и дублирующих соответственно; 3 — пластины плавящегося мундштука



Рис. 3. Центральная кабина управления агрегатами установки: 1, 2 — соответственно пульты управления правым и левым блоком; 3 — промышленный компьютер PC670 системы мониторинга режимов сварки; 4 — сигнальные лампочки контроля движения сварочных проволок

Производственный опыт свидетельствует, что надежность ведения процесса ЭШС обеспечивается в основном исключением вынужденных перерывов подачи электродных проволок в зону сварки. Процесс ЭШС начинается (преимущественно с «жидкого старта») подачей рабочих проволок, а дублирующие находятся в режиме «ожидания», который характеризуется скоростью подачи, равной нулю, или так называемой ползучей скоростью, составляющей 10...20 % рабочей. В случае вынужденной остановки рабочей проволоки система управления автоматически включает подачу соответствующего дублирующего аппарата, выключает вышедший из строя аппарат и одновременно сигнализирует в центральную кабину о происшедшей остановке световой индикацией, а также звуком. Затем сварщики-операторы определяют причину остановки и устраняют возникшую неисправность. После устранения неисправности руководителем работ из центральной кабины принимается решение о замене дублиру-

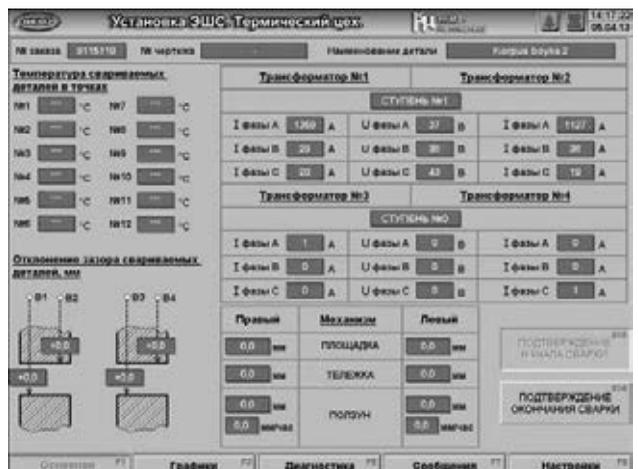


Рис. 4. Внешний вид главного окна системы контроля и мониторинга

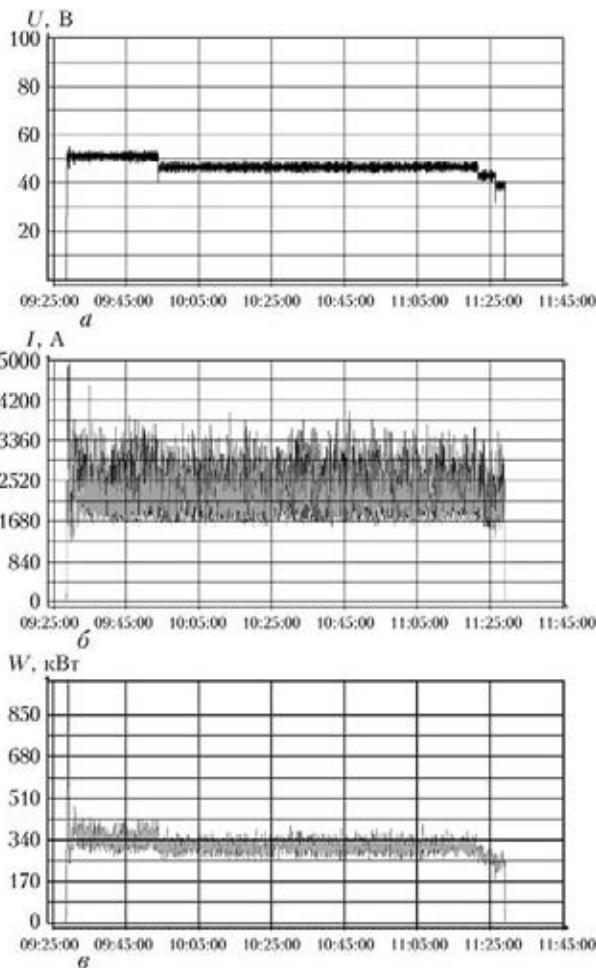


Рис. 5. Внешний вид общей графической информации, полученной в системе мониторинга: *а* — напряжение сварки; *б* — сварочный ток; *в* — электрическая мощность сварки

ющего аппарата на восстановленный рабочий или о продолжении работы дублирующего. В этом случае восстановленный аппарат становится дублирующим и может быть использован при остановке движения проволок на уже работающем аппарате.

Автоматизированная компьютерная система обеспечивает непрерывный, объективный контроль и мониторинг основных параметров режима, а также термомодеформационного цикла сварки. Система контроля представляет собой многофункциональный комплекс, в котором контроль параметров технологического процесса (сбор и обработка информации) осуществляется контроллером SIMATIC S7-300, а отображение параметров, регистрация и протоколирование накапливаемой информации осуществляется промышленным компьютером в панельном исполнении PC 670 и текстовыми панелями оператора OP 7. Программное обеспечение системы управления разработано с использованием пакета программ WinCC V5.1 фирмы «Siemens» и работает под управлением операционной системы Microsoft Windows.

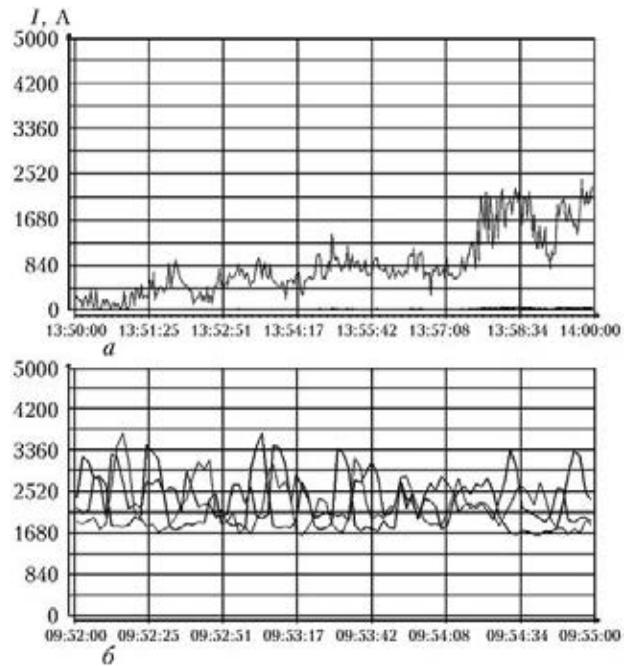


Рис. 6. Осциллограммы сварочного тока для: *а* — однофазной схемы плавящегося мундштука на участке шва через 50 мин от начала сварки ( $v_{\text{пп}} = 115$  м/ч); *б* — трехфазной схемы плавящихся мундштуков через 32 мин от начала сварки ( $v_{\text{пп}} = 150$  м/ч)

Внешний вид главного окна системы контроля и мониторинга показан на рис. 4.

Система контроля и мониторинга позволяет регистрировать в режиме реального времени такие важные параметры процесса сварки, как напряжение сварки, сварочный ток, выделяемую электрическую мощность, скорость подачи электродных проволок (рис. 5), скорость сварки, температуру нагрева свариваемых кромок и др.

Необходимая технологическая информация снимается со специализированных датчиков и другого электрооборудования непосредственно по месту. Сигналы от датчиков обрабатываются контроллером, который по определенному алгоритму преобразует входные данные в соответствующие технологические параметры процесса.

Все электрические параметры процесса (напряжение сварки, сварочный ток, электрическую мощность, скорость подачи сварочной проволоки) можно наблюдать непосредственно во время проведения сварки с разделением по привязке к силовой сварочной цепи установки. Например, можно отображать показания напряжения или сварочного тока отдельно на каждой фазе для каждого источника питания или в связке с другими показаниями, а скорость подачи проволоки на каждом аппарате. Текущие значения указанных параметров руководитель работ может корректировать на центральных пультах управления.

Осциллограммы записей параметров режима являются объективными характеристиками процесса сварки, которые подтверждают качество вы-



полненного процесса (его соответствие назначенному режиму сварки) и способствуют укреплению технологической дисциплины среди сварщиков. Расшифровка записей конкретного случая (во временных координатах) может помочь разобраться при необходимости в причинах образования дефекта в шве или для оценки режимов в интересующее время сварки (рис. 6).

Важно отметить, что анализ полученных записей осциллограмм может быть полезным также при отработке режимов и техники сварки для новых технологических процессов ЭШС ПМ металла больших толщин новых изделий.

В заключение можно отметить, что высокая надежность работы исполнительных органов установки для изготовления крупногабаритных металлоконструкций ЭШС ПМ в сочетании с

применением метода дублирования подачи электродных проволок в зону сварки, а также обязательное ведение контроля и автоматического мониторинга режимов сварки обеспечивают эффективное гарантированное получение сварных соединений металла больших сечений требуемого качества.

1. *Новая установка для электрошлаковой сварки крупных элементов на АО «Ново-Краматорский машиностроительный завод» / А. В. Невидомский, С. Г. Красильников, А. Д. Панин и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 50–52.*
2. *Волошкевич Г. З., Суцук-Слюсаренко И. И., Лычко И. И. Повышение надежности электрошлакового процесса при сварке протяженных швов // Там же. — 1965. — № 6. — С. 50–53.*
3. *Электрошлаковая сварка титановых сплавов / Я. Ю. Компан, В. Ф. Грабин, М. А. Абралов и др. — Ташкент: Фан, 1975. — 84 с.*

Поступила в редакцию 10.07.2013

Одиннадцатая международная научно-техническая конференция

## **«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка»**

28–30 мая 2014

г. Минск, Беларусь

### **Уважаемые коллеги!**

*Приглашаем Вас принять участие в Одиннадцатой международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», которая состоится 28–30 мая 2014 г. в Минске на базе Института порошковой металлургии (Минск, ул. Платонова, 41, 2-й этаж, зал заседаний).*

*Планируется издание сборника материалов докладов (до 3-х страниц с иллюстрациями) к началу проведения конференции.*

### Секции конференции:

1. Металлические порошковые материалы. Композиционные порошковые материалы: триботехнические, электротехнические, пористые и специальные. Технологии и моделирование процессов их получения и применения.
2. Наноматериалы и нанотехнологии. Сверхтвердые и керамические материалы.
3. Инженерия поверхности. Защитные покрытия: материалы, технология и оборудование для нанесения.
4. Новые технологии и оборудование сварочного производства. Соединение и деструкция материалов. Нетрадиционные металлургические технологии.

**Контакты:** 220005, Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41, Институт порошковой металлургии. (017) 293-98-12 Комякова Ольга Витальевна; (017) 293-98-46 Полешук Надежда Александровна, Маслакова Екатерина Александровна (доклады), факс (017) 292-82-42, E-mail: info50@mail.ru

## СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

И. В. ПРОТОВОКИЛОВ<sup>1</sup>, В. Б. ПОРОХОНЬКО<sup>1</sup>, А. Т. НАЗАРЧУК<sup>1</sup>, Ю. П. ИВОЧКИН<sup>2</sup>, Д. А. ВИНОГРАДОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН. 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, строен. 2.  
E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru

Эффективность использования электромагнитных воздействий для управления формированием соединения при электрошлаковой сварке во многом определяется схемой введения внешних магнитных полей в зону сварки и конструктивными особенностями соответствующих устройств. Цель настоящей работы заключалась в анализе способов создания внешних магнитных полей при электрошлаковой сварке стыковых соединений и оценке их воздействия на расплав сварочной ванны. Рассмотрены основные способы создания в сварочном зазоре продольных и поперечных магнитных полей, приведены принципиальные схемы соответствующих электромагнитных устройств. Показано, что направление и интенсивность электромагнитной силы, действующей на расплав сварочной ванны, прежде всего определяется пространственной ориентацией внешнего магнитного поля по отношению к свариваемому объекту, значением магнитной индукции поля и его частотными характеристиками. Рациональность использования той или иной схемы введения магнитного поля в зазор зависит от параметров сварного соединения и ее необходимо рассматривать отдельно в каждом конкретном случае. Отмечена целесообразность использования магнитных полей, обеспечивающих постоянную (циклическую) перестройку гидродинамической структуры течений в сварочной ванне или создающих вибрацию расплава. В этом направлении перспективно использование импульсных магнитных полей, созданных разрядами конденсаторных батарей на обмотки электромагнита. Показана актуальность разработки новых схем и устройств для создания магнитных полей и источников их питания. Библиогр. 15, рис. 9.

*Ключевые слова:* электрошлаковая сварка, сварочная ванна, магнитное поле, гидродинамика, электромагнитное воздействие, устройства ввода магнитных полей, магнитная индукция, электромагнитная сила

Электрошлаковая сварка (ЭШС) является одним из наиболее эффективных способов соединения толстостенных изделий и конструкций из различных металлов и сплавов [1–3]. Объемы использования и рациональные области применения ЭШС могли бы быть более значительными, если бы у соединений, выполненных электрошлаковой технологией, не были относительно низкие механические свойства, которые обусловлены грубой, крупнозернистой структурой металла шва и неблагоприятным влиянием термического цикла сварки на металл околосшовной зоны.

Эффективно улучшить эксплуатационные свойства соединений, выполненных ЭШС, можно путем управления гидродинамикой сварочной ванны с помощью внешних магнитных полей. Во многих работах отмечается положительное влияние электромагнитных воздействий на производительность процесса сварки, измельчение структуры металла шва, механические свойства сварных соединений [4–12]. Однако широкое практическое использование полученных результатов в значительной степени ограничивается сложностью достижения в зоне сварки внешних магнитных полей требуемой индукции и громоздкостью соответствующих устройств.

Цель настоящей работы заключалась в анализе способов и конструктивных схем введения внешних магнитных полей в зону сварки при ЭШС стыковых соединений, оценке их влияния на расплав сварочной ванны с учетом возможностей интенсификации электромагнитного воздействия.

Физический механизм электромагнитного воздействия при ЭШС заключается во взаимодействии внешнего магнитного поля со сварочным током, протекающим в расплавах шлаковой и металлической ванн [4]. Вследствие такого взаимодействия в сварочной ванне формируется объемная электромагнитная сила  $\vec{f}_e$ , приводящая к силовому воздействию на расплав. Значение и направление действия указанной силы определяются векторным произведением плотности тока в расплаве  $\vec{j}$  и индукции внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ :  $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$ . Изменять в широких пределах значение и направление тока сварки без ухудшения стабильности электрошлакового процесса и качества формирования сварного соединения достаточно сложно. Поэтому эффективность использования электромагнитного воздействия прежде всего определяется параметрами внешнего магнитного поля:

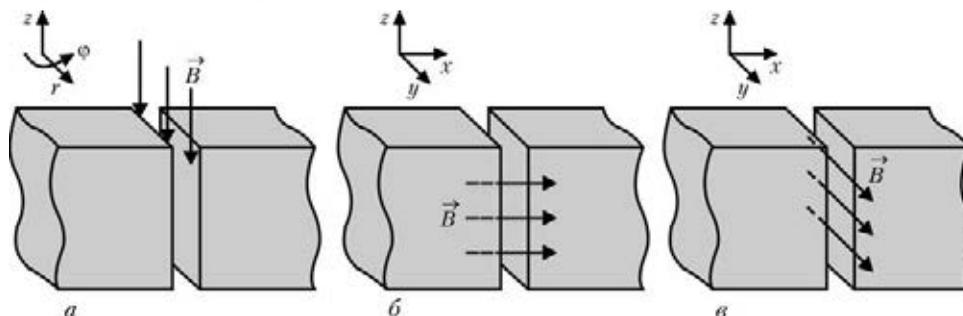


Рис. 1. Варианты введения внешних магнитных полей в зону сварки при ЭШС: *a* — продольное магнитное поле; *б, в* — поперечные магнитные поля

его пространственной ориентацией по отношению к свариваемому объекту, амплитудными и частотными характеристиками.

Следует также отметить, что эффективность введения магнитных полей в зону сварки в значительной степени определяется магнитными свойствами свариваемых изделий. В большинстве случаев более благоприятные условия создаются при сварке немагнитных материалов (титан, алюминий и др.), так как тогда эффект шунтирования магнитного поля в сварочном зазоре окружающими его ферромагнитными массами минимален. Исключения составляют случаи, когда свариваемые детали или элементы оснастки одновременно выполняют функции магнитопровода.

В зависимости от направления вектора индукции магнитного поля, используемые в процессах сварки, разделяют на продольные (вдоль оси электрода) и поперечные (перпендикулярно оси электрода) [4, 5, 13,14] (рис. 1). В свою очередь силовые линии последних могут быть сориентированы перпендикулярно (рис. 1, *б*) или параллельно (рис. 1, *в*) свариваемым кромкам.

В условиях ЭШС продольное магнитное поле можно создать соленоидом, расположенным в сва-

рочном зазоре в районе сухого вылета электрода [4, 6, 9] (рис. 2, *a*). Строго говоря, в данном случае продольное магнитное поле реализуется лишь в средней части соленоида. В сварочную ванну проникает магнитное поле, имеющее, помимо осевой составляющей, еще и радиальную. Таким образом, в цилиндрических координатах ( $z, r, \varphi$ ) ток сварки будет иметь составляющие  $(j_r, j_z, 0)$ , внешнее магнитное поле  $(B_z, B_r, 0)$ , а электромагнитная сила  $\vec{f}_e^z = \vec{j} \times \vec{B} = (0, 0, j_z B_r - j_r B_z)$ . Отсюда видно, что вызванная внешним магнитным полем электромагнитная сила будет приводить к движению расплава в горизонтальных плоскостях.

Рассмотренная схема, обеспечивающая локальный ввод магнитного поля в зону плавления электродной проволоки, где плотность тока максимальна, позволяет воздействовать на тепломассоперенос в данной области и управлять формированием и отрывом капель электродного металла. Однако в металлическую ванну проникает лишь незначительное поле рассеяния, что не позволяет воздействовать на структуру металла шва. Кроме того, данная схема создания магнитного поля в зоне сварки в большинстве случаев нетехнологична и сложна при практической реализации, так как размеры магнитной системы ограничены значением сварочного зазора (25...35 мм). Более перспективной представляется схема, когда в зону сварки вводится магнитопровод, а катушка размещена за его пределами (рис. 2, *б*).

Поперечное магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно свариваемым кромкам (рис. 1, *б*), можно реализовать с помощью обмоток, охватывающих свариваемые изделия и одновременно выполняющих функции магнитопровода (рис. 3). В декартовой системе координат ( $x, y, z$ ) (рис. 1, *б*) электромагнитная сила будет иметь составляющие  $\vec{f}_e^z = (0, j_z B_x - j_y B_x)$ . Поскольку составляющая тока сварки  $j_z$  значительно превосходит составляющую  $j_y$ , то можно считать, что основной эффект от воздействия указанного магнитного поля заключается в формировании в расплаве электромагнитных сил, ориентированных вдоль свариваемых кромок (вдоль оси  $y$ , рис. 1, *б*). Если внешнее

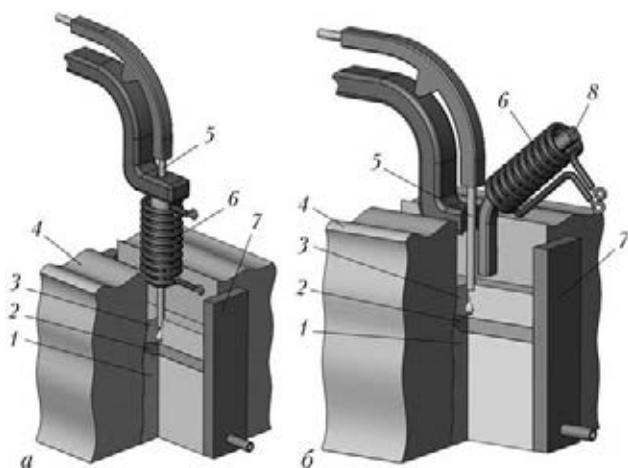


Рис. 2. Схемы введения продольного магнитного поля посредством соленоида, расположенного в зоне сварки (*a*), и стержневого магнитопровода (*б*): 1 — сварной шов; 2 — металлическая ванна; 3 — шлаковая ванна; 4 — свариваемый образец; 5 — проволока; 6 — электромагнитная система; 7 — водоохлаждаемая формирующая планка; 8 — магнитопровод

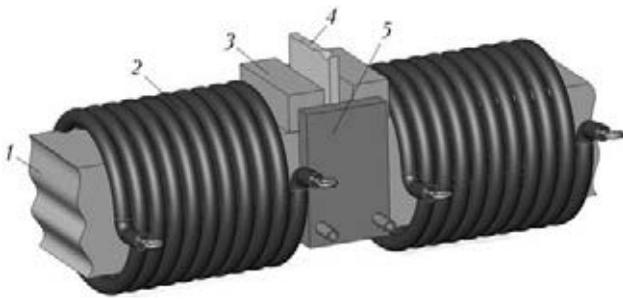


Рис. 3. Схема введения поперечного магнитного поля с помощью катушек, смонтированных на свариваемых изделиях: 1 — свариваемый образец; 2 — электромагнитная система; 3 — выводные планки; 4 — электрод; 5 — водоохлаждаемая формирующая планка

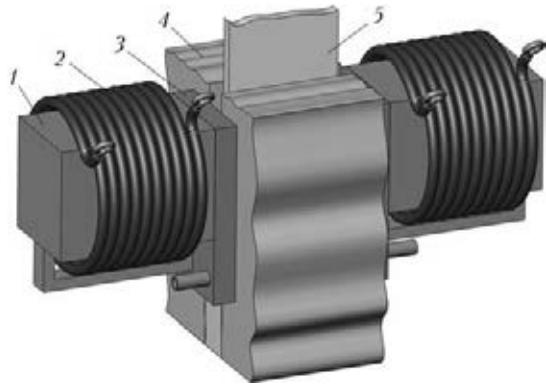


Рис. 4. Схема введения поперечного магнитного поля с помощью электромагнитов со стержневым магнитопроводом: 1 — стержневой магнитопровод; 2 — катушка; 3 — водоохлаждаемая формирующая планка; 4 — свариваемый образец; 5 — электрод

магнитное поле постоянное, а ток сварки переменный, то в ванне создается возвратно-поступательное движение (вибрация) расплава вдоль свариваемых кромок с частотой тока сварки (50 Гц). Указанный эффект может позитивно влиять на теплоперенос в сварочной ванне и измельчение структуры металла шва.

Если ток сварки и магнитное поле переменные (или оба постоянные), то наличие  $x$  и  $z$  составляющих электромагнитной силы приведет к сложной объемной картине течений расплава [4]. При этом  $z$  компонента электромагнитной силы имеет разное направление в двух частях ванны, что приведет к перекоосу свободной поверхности шлаковой ванны. Последний эффект является негативным с точки зрения формирования сварного соединения, так как нарушает симметрию процесса.

Преимущество приведенной схемы создания магнитного поля заключается в достаточности минимального зазора между магнитами, равного сварочному, благодаря чему в зоне сварки удастся создать равномерное магнитное поле с высокими значениями индукции (до 0,4 Тл). Такие мощные магнитные поля позволяют воздействовать на макроструктуру металла шва, измельчая и гомогенизируя ее. Однако очевидно, что данную схему

воздействия сложно реализовать при сварке крупногабаритных изделий и изделий сложной конфигурации, поэтому она может найти применение лишь при сварке компактных конструкций.

Наиболее технологичной и чаще всего применяемой при ЭШС (встречаемой в литературе) является схема введения внешнего поперечного магнитного поля с помощью электромагнитов, расположенных у боковых формирующих устройств [4, 5, 8, 12]. При сварке протяжных стыков предусматривается их перемещение вдоль кромок со скоростью сварки. Сердечники электромагнитов могут быть как стержневой, так и П-образной формы.

Достаточно компактны электромагниты с односердечниковыми сердечниками (рис. 4) [5]. Такие устройства создают преимущественно поле, силовые линии которого перпендикулярны свариваемым кромкам. В данном случае в декартовой системе координат  $(x, y, z)$  электромагнитная сила будет иметь составляющие  $\vec{j}_e = (-j_z B_y, 0, j_x B_y)$  (см. рис. 1, в), т. е. с учетом того, что  $j_z > j_x$ , основная компонента электромагнитной силы будет на-

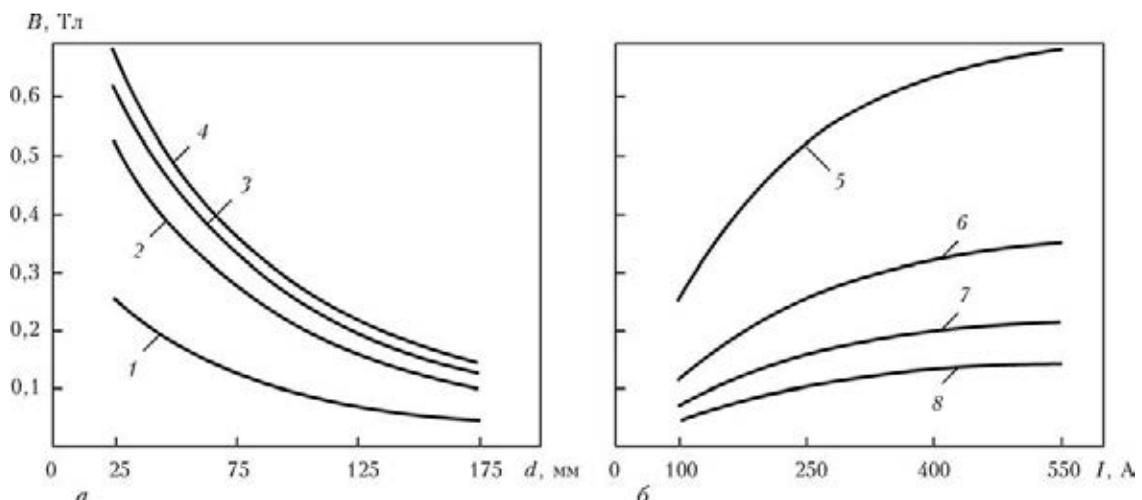


Рис. 5. Зависимости магнитной индукции от зазора  $d$  между магнитопроводами (а) и электрического тока  $I$  в обмотках электромагнита (б): 1 —  $I = 100$  А; 2 — 250; 3 — 400; 4 — 550; 5 —  $d = 25$  мм; 6 — 75; 7 — 125; 8 — 175

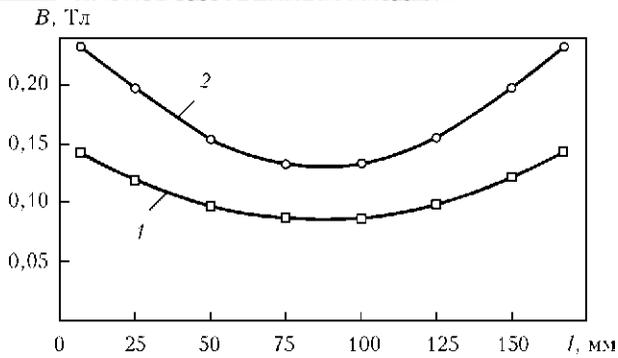


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в сварочном зазоре ( $l$  — расстояние от свариваемой кромки): 1 —  $I = 200$  А; 2 — 400

правлена поперек свариваемых кромок (вдоль оси  $x$ , см. рис. 1, в). При использовании постоянного магнитного поля (ток сварки переменный) это приведет к вибрации расплава сварочной ванны поперек свариваемых кромок. Такие возвратно-поступательные движения расплава в двухфазной области могут способствовать дроблению растущих кристаллитов и измельчению структуры металла шва. Поперечная вибрация в сварочном зазоре также увеличивает проплавление свариваемых кромок, что позволяет снижать погонную энергию сварки [4, 10].

Недостатком данного способа введения магнитного поля является его рассеивание вследствие значительного зазора между полюсами электромагнита, которое определяется толщиной свариваемых изделий и водоохлаждаемых формирующих

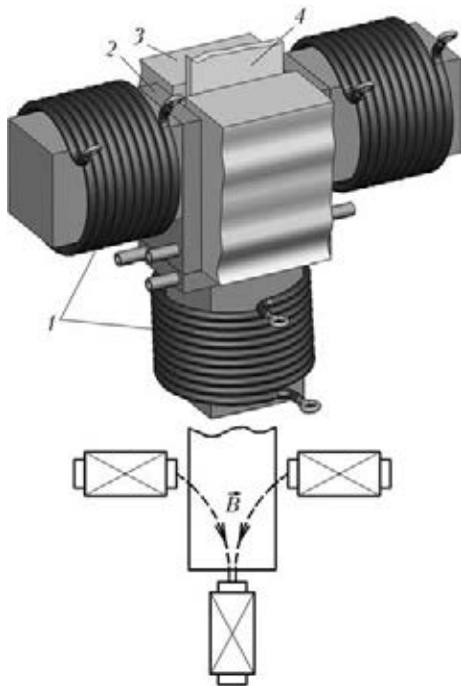


Рис. 7. Схема введения комбинированного магнитного поля с помощью электромагнитов со стержневым магнитопроводом: 1 — электромагниты; 2 — водоохлаждаемая формирующая планка; 3 — свариваемый образец; 4 — электрод

планок (ползунов). С увеличением толщины изделий рассеивание возрастает и эффективность электромагнитного воздействия снижается.

Результаты экспериментальных измерений индукции магнитного поля по оси сварки, созданного электромагнитами с сечением стального магнитопровода  $70 \text{ см}^2$  и общим количеством витков 160, приведенные на рис. 5, 6, показывают значительное снижение индукции магнитного поля при увеличении зазора между магнитопроводами (толщины свариваемых изделий) (рис. 5, а), а также относительную неравномерность распределения магнитной индукции в сварочном зазоре (рис. 6).

С помощью стержневых электромагнитов можно создать комбинированную схему воздействия магнитным полем на сварочную ванну. Суть схемы заключается в использовании дополнительного стержневого электромагнита, расположенного в нижней части сварного стыка (рис. 7). При заданном подключении катушек на сварочную ванну будет действовать комбинированное магнитное поле, имеющее поперечную и продольную составляющие. Используя коммутацию подключения обмоток, можно поочередно воздействовать продольным и поперечным полями. Указанная схема расширяет возможности управления гидродинамикой сварочной ванны. Однако очевидно, что она неприемлема при выполнении протяженных швов.

Использование электромагнитов с П-образным сердечником также дает возможность введения в зону сварки поперечного и продольного магнитных полей (рис. 8).

При ориентации электромагнитов вдоль оси сварки и встречном подключении обмоток в зазоре формируется магнитное поле, имеющее преимущественно осевую составляющую (рис. 8, б). При согласованном подключении обмоток можно создать поперечное поле, силовые линии которого имеют противоположное направление в разных зонах по высоте зазора (рис. 8, в). Это дает возможность при соответствующем расположении магнитов относительно сварочной ванны воздействовать на расплавы шлаковой и металлической ванн противоположно направленными полями и создавать, к примеру, их вибрацию в противофазе. Указанный эффект может быть полезен для активизации процессов теплопереноса в ванне и взаимодействия шлак-металл.

При расположении электромагнитов перпендикулярно оси в зоне сварки можно создать магнитное поле, силовые линии которого направлены от кромки к кромке (рис. 8, д).

Ограниченность доступа к свариваемым деталям в ряде случаев затрудняет использование рассмотренных выше устройств. К их недостаткам также следует отнести неравномерность магнитного поля в сварочном зазоре и необходимость перемещения магнитов в процессе сварки вдоль кромок.

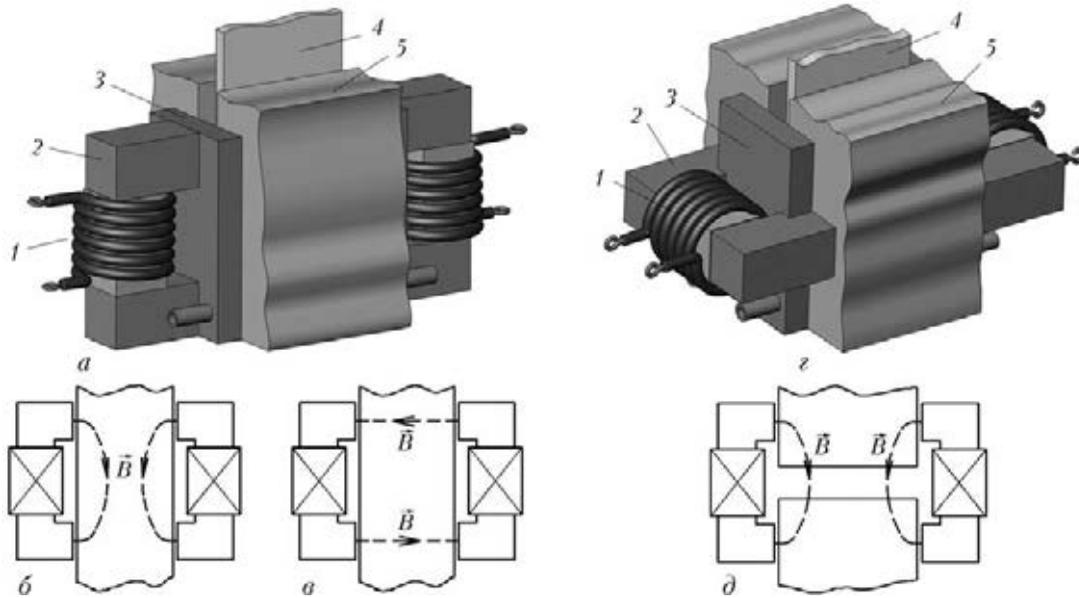


Рис. 8. Схема введения поперечного магнитного поля с помощью электромагнитов с П-образным сердечником, ориентированным вдоль (а-в) и перпендикулярно (с, д) оси сварки: 1 — катушка; 2 — П-образный сердечник; 3 — водоохлаждаемая формирующая планка; 4 — электрод; 5 — свариваемый образец

Указанных недостатков лишено устройство для введения поперечного магнитного поля, представленное на рис. 9 [4]. Магнитопровод этого устройства одновременно выполняет функции опорных стенок для формирующих шов планок. Расположение катушек магнита под сварочным столом во многом облегчает работу оператора. Устройство позволяет создавать магнитное поле вдоль всей протяженности шва. Магнитную индукцию в зазоре рассчитывают по формуле  $\bar{B} = k\mu_0 In / (l_{Fe} / \mu_{Fe} + d)$ , где  $k$  — коэффициент, учитывающий рассеивание поля в зазоре (0,75);  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ;  $I$  — сила тока в обмотках;  $n$  — количество витков;  $l_{Fe}$  — длина магнитопровода;  $\mu_{Fe}$  — магнитная проницаемость материала магнитопровода;  $d$  — зазор между полюсами.

Помимо пространственной ориентации магнитного поля, эффективность электромагнитного воздействия определяется его частотными и амплитудными характеристиками.

Имеющиеся в литературе сведения указывают на достаточно широкий диапазон индукции применяемых при ЭШС магнитных полей 0,01...0,2 Тл [4–12]. Вероятно, что для управления микроструктурой металла достаточно относительно небольших значений индукции 0,01...0,05 Тл. Однако опыт авторов в использовании управляющих магнитных полей в электрошлаковых процессах показывает, что для воздействия на кристаллизацию металла и его макроструктуру, управления параметрами сварочной ванны и проплавлением основного металла необходимо использование более мощных магнитных полей 0,1...0,2 Тл.

Следует также отметить, что схемы воздействия, создающие устойчивые электровихревые течения в

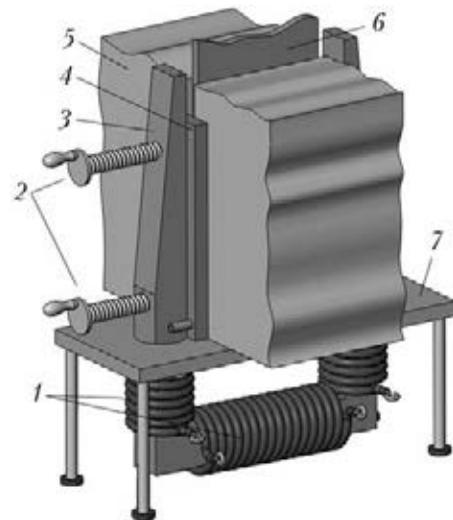


Рис. 9. Устройство для электрошлаковой сварки во внешнем магнитном поле: 1 — катушки; 2 — прижимы; 3 — магнитопровод; 4 — водоохлаждаемая формирующая планка; 5 — свариваемый образец; 6 — электрод; 7 — опора

ванне, могут негативно влиять на химическую однородность и свойства наплавленного металла. Более эффективно использование полей, обеспечивающих постоянную (циклическую) перестройку гидродинамической структуры течений или создающих вибрацию расплава ванны. В этом направлении перспективно использование импульсных магнитных полей, созданных разрядами конденсаторных батарей на обмотки электромагнита [15]. Такая схема воздействия за счет высоких пиковых токов в обмотках (до 10 кА) позволяет создавать в зоне сварки мощные магнитные поля при снижении массогабаритных характеристик соответствующих устройств.

**Заключение**

Каждая из рассмотренных в статье схем создания магнитных полей для воздействия на процесс ЭШС имеет свои преимущества и недостатки, и целесообразность использования той или иной схемы необходимо рассматривать отдельно в каждом конкретном случае. При выполнении протяженных швов рационально применять подвижные электромагнитные устройства, перемещающиеся вдоль шва вместе с формирующими ползунами. При сварке компактных сечений могут быть использованы стационарные электромагниты.

Ввиду сложности создания при ЭШС в зоне сварки продольного магнитного поля достаточной индукции (0,1...0,2 Тл) его применение для воздействия на кристаллизацию металла шва менее эффективно, чем использование поперечных магнитных полей. При этом наиболее перспективным представляется использование импульсных полей, обеспечивающих постоянную (циклическую) перестройку структуры течений расплава ванны или создающих его вибрацию, при снижении массогабаритных характеристик соответствующих устройств.

Дальнейшие исследования в области электромагнитного управления процессом ЭШС необходимо вести комплексно путем разработки рациональных схем создания магнитных полей в сварочном зазоре с учетом конструктивных особенностей электромагнитных устройств для их создания и разработки источников их питания.

*Работы выполняются при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект № Ф53.7/027) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект Укр\_ф\_а № 13-08-90444).*

1. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.

2. *Yushchenko K. A., Lychko I. I., Sushchuk-Slyusarenko I. I. Effective techniques of electroslag welding and prospects for their application in welding production.* — 1998. — 108 p. — (Welding and surfacing reviews; vol. 12, part 2).
3. *Электрошлаковая сварка (перспективы развития)* / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, А. М. Пальти и др. // *Автомат. сварка.* — 1999. — № 9. — С. 4–6.
4. *Компан Я. Ю., Щербинин Э. В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
5. *Кузнецов В. Д., Козаков Н. К., Шальда Л. М.* Магнитное управление электрошлаковым процессом. — Киев: Вища шк., 1987. — 64 с.
6. *Дудко Д. А., Рублевский И. Н.* Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе // *Автомат. сварка.* — 1960. — № 9. — С. 12–16.
7. *Трочун И. П., Черныш В. П.* Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // *Свароч. пр-во.* — 1965. — № 11. — С. 3–5.
8. *Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б.* Управление формированием сварных соединений при ЭШС (Обзор) // *Автомат. сварка.* — 2012. — № 10. — С. 54–60.
9. *Компан Я. Ю., Петров А. Н., Шарамкин В. И.* Некоторые особенности электрошлаковой сварки в продольно-радиальном магнитном поле // *Там же.* — 1978. — № 9. — С. 39–43.
10. *Порохонько В. Б., Протоковиллов И. В., Петров Д. А.* Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия // *Вісн. НУК імені Адмірала Макарова.* — 2012. — № 5. — С. 170–176. Электронный ресурс — <http://ev.nuos.edu.ua/ua/>
11. *Волков Г. Г.* Электрошлаковая сварка с применением переменного электромагнитного поля // *Монтаж и специальные работы в стр-ве.* — 1975. — № 8. — С. 14–15.
12. *Козаков Н. К., Кузнецов В. Д., Кораб Н. Г.* Выбор способа ввода магнитного поля при электрошлаковой сварке // *Вест. Киев. политехн. ин-та. Сер. Машиностроение.* — 1981. — Вып. 18. — С. 76–78.
13. *Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д.* Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (Обзор) // *Автомат. сварка.* — 2006. — № 10. — С. 36–44.
14. *Размышляев А. Д., Миронова М. В., Ярмонов С. В.* Устройства ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки (Обзор) // *Там же.* — 2013. — № 1. — С. 40–44.
15. *Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах* / Я. Ю. Компан, А. Т. Назарчук, И. В. Протоковиллов, Д. А. Петров // *Современ. электрометаллургия.* — 2012. — № 2. — С. 8–13.

Поступила в редакцию 15.08.2013

6-й Международный промышленный форум

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ — ПРОРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ

15–18 апреля 2014

г. Челябинск, Россия

*В рамках форума пройдут специализированные выставки: XVII «Металлургия. Метмаш», XVIII «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент», «Промэнерго. Энергосбережение и энергоэффективность», XIV «Экология. Промышленная безопасность».*

### Организаторы:

- Правительство Челябинской области
- Центр Международной Торговли Челябинск Ч ОАО «Челябгипромез»

### Официальная поддержка:

- Министерство промышленности и торговли РФ

### Информационные партнеры Форума:

- Научно-технический и производственный журнал «Сталь»
- Научно-технический и производственный журнал «Металлург»

<http://www.promforum74.ru/about/>



УДК 621.791.04:669

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СВАРНЫХ УЗЛОВ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ НА ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

П. А. ГАВРИШ, В. П. ШЕПОТЬКО

Донбасская государственная машиностроительная академия. Украина, 84313, г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72.  
E-mail: nauka\_breda@mail.ru

Повышение надежности и безопасности конструкций машин и механизмов, длительно эксплуатируемых в условиях циклического нагружения, приобретает все большую актуальность. На примере сварных узлов перегружателя выполнен анализ конструктивных решений исполнения указанных узлов с учетом нагруженности. Особое внимание уделено вопросам снижения конструктивных концентраторов напряжений сварных узлов. Предложена усовершенствованная конструкция узла диафрагмы главных балок перегружателя, а также форма подготовки кромок токосъемника, обеспечивающая высокое качество сварных соединений, и, следовательно, требуемую долговечность. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* концентраторы напряжений, сварной узел, методика анализа, напряженно-деформированное состояние, конструктивное исполнение сварных узлов

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации конструкций машин, работающих в условиях циклических нагрузок, с каждым годом становится более актуальным, так как физический износ машин на предприятиях значительно опережает темпы технического переоснащения. Основа всех машин и механизмов — металлоконструкция, чаще сварная, поэтому на их дальнейшую эксплуатацию влияют в основном надежность и безопасность эксплуатации. В Украине не каждое предприятие имеет достаточно средств на техническое переоборудование, поэтому своевременное выявление повреждений и модернизация металлоконструкций позволяет уравновесить проблемы старения машин и проблемы надежной и безопасной их эксплуатации [1]. Анализ исполнения изделия проводится после его обследования. Оценка технического состояния является одной из регламентированных процедур, выполняемых с целью проверки уровня надежности (безотказности) и долговечности конструкций, а также определения возможности их использования по назначению на предусмотренных проектом условиях и на прогнозируемый срок эксплуатации [2].

Цель проведения специальных обследований, которые осуществляются, как правило, силами специализированных организаций — получение фактических данных о техническом состоянии конструкций. Применяя методику анализа конструктивного исполнения металлоконструкций, разрабатывают рекомендации по дальнейшей их эксплуатации. Объем и степень детализации об-

следований зависят от наличия технической и эксплуатационной документации, состояния и степени повреждения конструкций и в конечном счете определяют комплекс реконструкционных и ремонтных работ.

Снижение уровня служебных свойств сварных узлов наблюдается при следующих повреждениях конструкции [3]:

- остаточные деформации металлоконструкции;
- местные повреждения элементов;
- разрушение или уменьшение площади поперечного сечения элементов вследствие коррозии;
- разрушение, вспучивание элементов замкнутого сечения или вздутие элементов вследствие замерзания в них воды.

Ремонт и модернизацию сварных узлов металлоконструкций необходимо проводить таким образом, чтобы максимально исключить их конструктивные недостатки.

**Анализ конструктивных недостатков оформления сварных узлов перегружателя и примеры их усовершенствования.** На примере конструктивных особенностей изготовления сварных узлов перегружателя фирмы «ТАКРАФ» исследовано их влияние на долговечность крана [4–6].

Установка продольных ребер жесткости во внутренних отсеках перегружателя повышает момент инерции сечений, снижает размах циклических нагрузок (рис. 1). Но подобное конструктивное исполнение главных балок перегружателя может привести к негативным последствиям при эксплуатации подъемного сооружения, поскольку приварка нижнего продольного ребра жесткости



Рис. 1. Ребра жесткости внутренних отсеков перегружателя вблизи диафрагмы формирует конструктивный концентратор напряжений [2].

На рис. 2 показана конструкция сварного узла перегружателя.

Долговечность его эксплуатации определяют следующие особенности [5, 6]:

- концентрация напряжений возле концов уголков;

- остаточные сварочные напряжения, вызванные нагреванием металла концентрированным источником тепла;

- расположение сварных швов на расстоянии менее 10...20 мм;

- неоднородности геометрической формы, химического состава, механических свойств, микроструктуры;

- повышенная жесткость конструкции в местах сближения сварных швов.

Эксплуатация перегружателя в условиях циклических напряжений приводит к возникновению усталостных и слоистых разрушений. На рис. 2 показаны трещины, выявленные у концов уголков. Ультразвуковое обследование выявило сквозные трещины нижнего пояса. Расчеты напряжений, выполненные методом конечных элементов показали следующие значения напряжений в узлах пролетных балок перегружателя (таблица).

При эксплуатации перегружателя в условиях циклического нагружения возникают повреждения в пролетных балках. Анализ выводов экспертных обследований перегружателей, эксплуатировавшихся на Крымском содовом заводе в течение 30 лет, показал, что трещины локализируются в подрельсовой зоне верхнего пояса, местах передачи силового потока (жесткая или гибкая опора) нижнего пояса, а также в местах соединения ветрового подкоса с нижним поясом (рис. 3). Как правило, повреждения концентрируются в пролетных балках

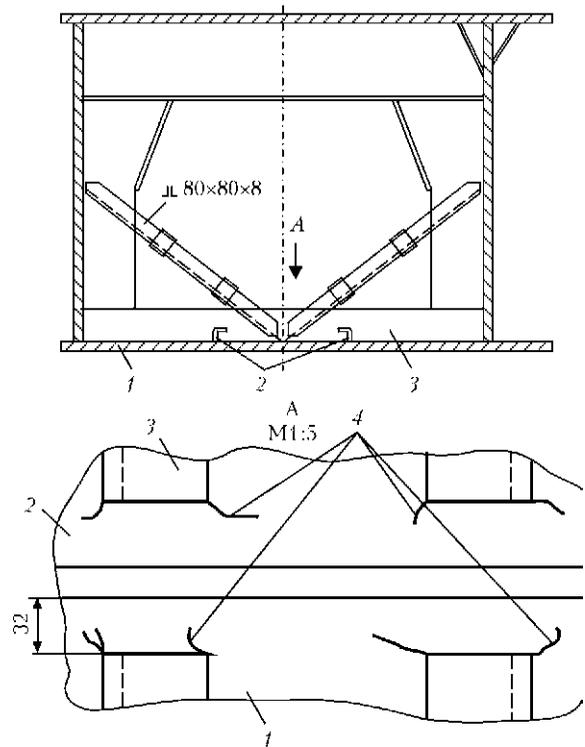


Рис. 2. Схема нижнего сварного пояса пролетных балок перегружателя: 1 — нижний пояс пролетной балки перегружателя; 2 — диафрагма; 3 — уголки жесткости; 4 — трещины

в жесткой и гибкой опорах, в средней части пролета, а для перегружателей с комбинированной системой — в местах присоединения к коробчатым балкам элементов подвески. Появление трещин является следствием недостаточного момента инерции сечения отсеков перегружателя, конструктивных недостатков сварных узлов, некачественной подготовки кромок к сварке, дефектов технологии сварки.

Для экспериментального исследования уровня переменных напряжений при работе перегружателя применялись тензорезисторы, которые были объединены в тензорозетки и установлены в местах наибольших расчетных напряжений.

**Зависимость расчетных напряжений (МПа) в узлах пролетных балок перегружателя от расположения груза**

Расчетные элементы пролетных балок перегружателя	Без груза (собственный вес)	На консоли слева	Посередине пролета	На консоли справа
3-4	127	144	280	133
4-5	160	198	260	155
5-6	250	280	320	250
6-7	170	220	290	190
7-8	170	180	240	180
8-9	190	250	270	200
9-10	130	230	290	142
10-11	250	270	310	260
11-12	190	226	288	210

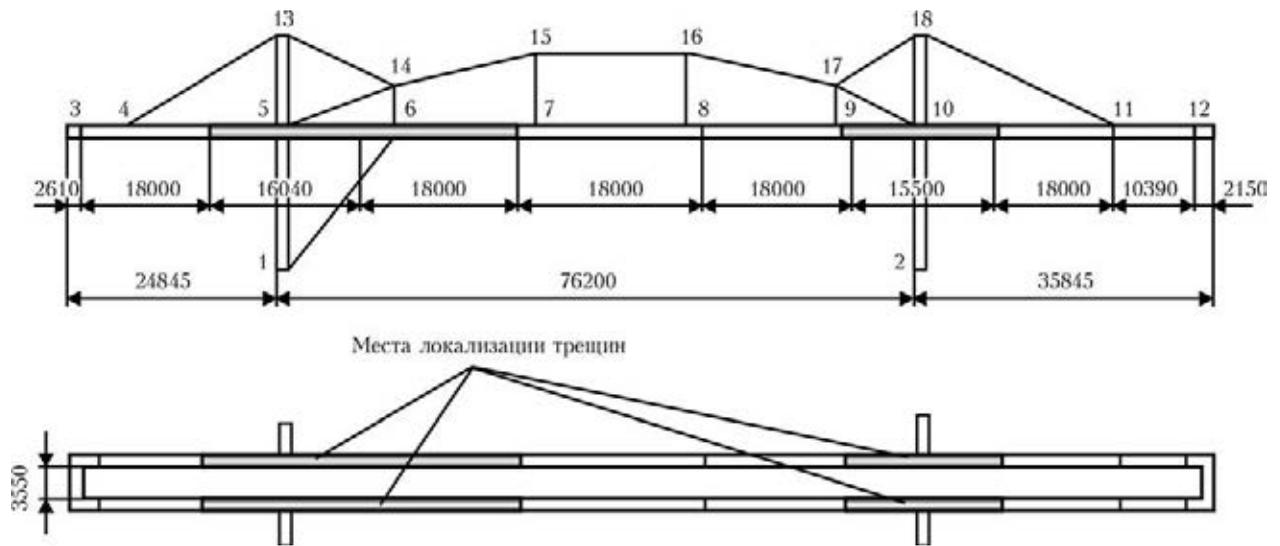


Рис. 3. Места локализации трещин перегружателя

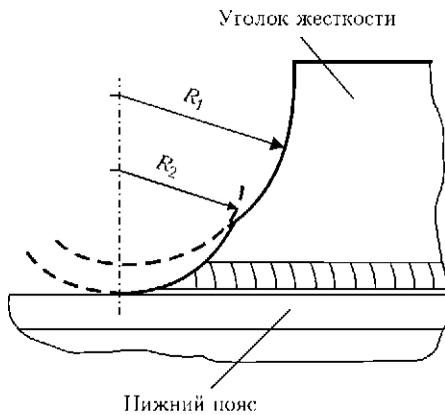


Рис. 4. Измененная конструкция сварного узла уголка жесткости

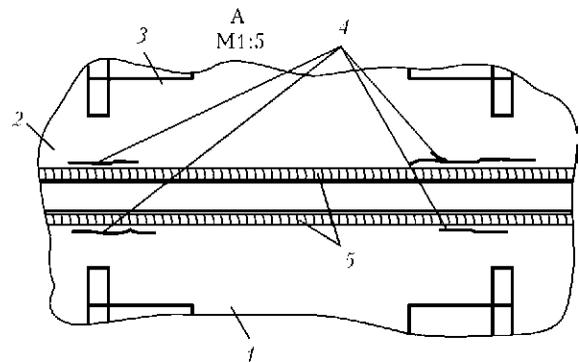


Рис. 5. Трещины в зоне сплавления сварного шва диафрагмы: 1-4 — см. на рис. 2; 5 — сварные швы диафрагмы

В результате обработки данных экспериментальных исследований установлены места возникновения дефектов в верхнем поясе пролетных балок: на гибкой опоре, где растягивающие напряжения изменяются в пределах  $(0,2...0,7)\sigma_T$  при расположении тележки с грузом на участке разгрузки вагонов (консоль гибкой опоры); на жесткой опоре, где растягивающие напряжения изменяются в пределах  $(0,1...0,5)\sigma_T$  при расположении тележки с грузом на участке загрузки бункеров (консоль жесткой опоры). Выяснено, что растягивающие напряжения изменяются в пределах  $(0,2...0,6)\sigma_T$  при передвижении тележки с грузом посередине пролета.

Для снижения вероятности появления трещин в нижнем поясе (диафрагма и уголки жесткости) была изменена конструкция сварного узла уголка жесткости. Концентраторы напряжений устранены путем плавного перехода от основного металла (нижний пояс) до самого уголка (рис. 4).

Плавный переход от основного металла к металлу уголка уменьшил концентрацию напряжений. Такое изменение конструктивных особенностей узла исключило появление трещин у концов

уголков (на протяжении трех лет эксплуатации). Однако трещины появились в зоне сплавления сварного шва диафрагмы (рис. 5), что обусловлено воздействием циклических напряжений на нижний пояс и отсутствием ребра жесткости вблизи диафрагмы. Для устранения этого дефекта был выбран вариант конструктивного оформления сварного узла с продолжением уголков жесткости через отверстия в диафрагме (рис. 6).

После изменения конструкции сварного узла трещины в зоне сплавления сварного шва диафрагмы не возникали.

Показано, что при сварке и наплавке токосъемников перегружателя, установленных вдоль главных балок, прочность соединения меди со сталью недостаточна. Частый выход из строя токосъемников приводил к простоям крана. Форма подготовки кромок при сварке меди и стали была симметричной, что не соответствовало отличительным теплофизическим свойствам меди и стали. Анализ геометрической формы подготовки кромок с учетом физико-химических свойств стали и меди показал, что конструкция подготовки кромок должна быть асимметричной для обеспечения равнопрочности сварного соединения и ка-



Рис. 6. Сварной узел измененной конструкции

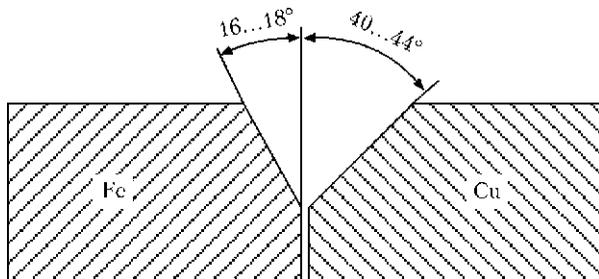


Рис. 7. Схема подготовки кромок деталей токосъемников перегружателя

чественного сварного шва [7, 8]. На рис. 7 приведена схема подготовки кромок деталей токосъемников под сварку.

Сварка деталей токосъемников и их эксплуатация показали целесообразность применения предложенной конструктивной формы подготовки кромок. Рис. 8 иллюстрирует бездефектное сварное соединение меди со сталью.

Предложенная конструктивная форма сварных узлов разнородных металлов существенно повысила качество сварного соединения и его долговечность.



Рис. 8. Бездефектное сварное соединение меди со сталью

### Выводы

1. Расчетные и экспериментальные исследования мест образования повреждений пролетных балок перегружателя и условий их нагружения показали необходимость конструктивного усовершенствования сварных узлов.

2. Предложена усовершенствованная конструкция сварного узла диафрагмы главных балок перегружателя, показавшая высокие эксплуатационные свойства.

3. Предложена новая конструктивная форма подготовки кромок узла сварки разнородных металлов токосъемников перегружателя, обеспечивающая высокое качество сварного соединения и требуемую долговечность.

1. *Методика анализа конструктивного исполнения сварных металлоконструкций* / К.-Г. Гроте, Ю. Е. Постников, Н. А. Макаренко и др. // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Университетская наука-2012», 2012. — Мариуполь: ПГТУ, 2012. — Т. 2. — С. 303.
2. *Гавриш П. А., Шепотько В. П., Кассов В. Д.* Ушкодження кранових металлоконструкцій. Діагностика. Ремонт: Навч. посібник. — Краматорськ: Донбас. держ. машинобудів. акад., 2012. — 280 с.
3. *Усталостные повреждения сварных крановых конструкций* / О. А. Емельянов, В. П. Шепотько, С. В. Лубенец и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 33–39.
4. *Шепотько В. П., Гавриш П. А.* Анализ конструктивного оформления сварных узлов при ремонте крановых металлоконструкций // Подъемные сооружения и специальная техника. — 2012. — № 4. — С. 10–11.
5. *Шепотько В. П., Гавриш П. А.* Технологичность ремонтной сварки крановых металлоконструкций // Там же. — 2012. — № 5. — С. 12–13.
6. *Die bewertungsmethodik der bauausfuhrung der untergleiszone der haupttrager der verladebrucke* / К.-Г. Grote, J. Postnikov, N. Makarenko et al. // Вісн. Донбас. держ. машинобудів. акад. — 2012. — № 3(28). — С. 110–113.
7. *Gavrish P. A., Tulupov V. I.* Preliminary heating at welding of copper with steel // The 10th Intern. conf. «Research and development in mechanical industry», Donji Milanovac, Serbia, 16-17 Sept., 2010. — Donji Milanovac: RaDMI, 2010. — P. 156–158.
8. *Пат. 75036 Україна, МПК В 23 К 13/00.* Спосіб зварювання різнорідних металів / П. А. Гавриш, В. І. Тулупов. — Заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. — 201202789; Заявл. 12.03.2012; Надрук. 26.11.2012, Бюл. № 22. — 3 с.

Поступила в редакцию 04.07.2013



## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



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

**Ключков И. Н.** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 25 сентября 2013 г. кандидатскую диссертацию на тему «Повышение долговечности тонколистовых сварных соединений алюминиевых

сплавов высокочастотной проковкой».

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию закономерностей сопротивления усталости тонколистовых ( $\delta = 2...3$  мм) сварных соединений алюминиевых сплавов средней и высокой прочности, выполненных способом импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом (ИДСПЭ) в инертных газах, а также установлению эффективности повышения их циклической долговечности путем использования технологии высокочастотной механической проковки (ВМП) по установленным параметрам упрочнения.

Изложены технологические особенности ИДСПЭ в инертных газах тонколистовых соединений алюминиевых сплавов Д16Т, АМг6 и 6061-Т6 толщиной 2 мм и нахлесточных толщиной 2 и 3 мм.

Исследовано влияние режимов сварки на геометрические параметры швов, их макроструктуру и механические свойства соединений. Отработаны параметры по технологии сварки для получения качественных соединений.

На основе измерения микротвердости, локальных геометрических параметров шва и угловой остаточной деформации установлены эффективные параметры упрочнения с использованием технологии ВМП тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов средней и высокой прочности с помощью портативного ручного оборудования USP-300. Диапазон скорости проведения ВМП таких соединений составляет 7...9 мм/с, диаметр бойков соответственно 3 и 2 мм для лицевой и корневой сторон шва, амплитуда колебаний торца волновода 16 мкм.

При таких параметрах обеспечивается пластическое деформирование металла в обрабатываемой зоне соединения без нарушения его геометрической формы на глубину до 0,28 мм.

Исследовано влияние ВМП металла перехода шва к основному металлу на изменение коэффициента концентрации напряжений, остаточных сварочных напряжений и структуры поверхностного слоя стыковых соединений алюминиевых сплавов малых толщин. Показано, что увеличение радиуса сопряжения шва с основным металлом и устранение угловой остаточной деформации от-

гибанием после обработки ВМП обеспечивает снижение коэффициента концентрации напряжений в соединениях в 1,35...1,49 раза. Установлено, что долговечность на базе испытаний  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений для упрочненных стыковых соединений сплава Д16Т увеличивается в 5 раз, для сплава АМг6 — в 4 раза, для сплава 6061-Т6 — в 7 раз по сравнению с исходным после сварки состоянием. Показано, что ВМП не снижает статическую прочность исследуемых тонколистовых соединений.

Установлено влияние несоосности передачи приложенной нагрузки и степени нахлеста на сопротивление усталости тонколистовых нахлесточных сварных соединений алюминиевых сплавов АМг6 и 6061-Т6, выполненных способом ИДСПЭ. Обосновано применение ВМП зон перехода металла шва к основному металлу нахлесточных соединений как способа холодной правки для устранения несоосности передачи нагрузки с целью повышения сопротивления усталости.

Определено, что упрочнение ВМП галтельных участков зон сплавления двух угловых швов тонколистовых нахлесточных соединений исследуемых алюминиевых сплавов приводит к повышению их ограниченных пределов выносливости, увеличивая циклическую долговечность до 30 раз при отнулевом переменном нагружении.

Аналитическим и численным методами установлено, что устранение несоосности передачи нагрузки такими соединениями снижает напряжения в зоне концентрации до 3 раз.

Приведены рекомендации для эффективного упрочнения ВМП тонколистовых сварных соединений с целью повышения их циклической долговечности и устранения остаточных сварочных деформаций.



Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины.

**И. Л. Семенов** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 24 октября 2013 г. кандидатскую диссертацию на тему «Влияние столкновений на экранирование макрочастиц в слабоионизированной плазме».

В диссертационной работе проведен анализ влияния столкновений между компонентами слабоионизированной плазмы на процессы зарядки и экранировки макрочастиц. Предложен новый подход к моделированию указанных процессов, который основан на численном решении системы



кинетических уравнений Власова с модельными интегралами столкновений. Получены зависимости заряда макрочастиц различного размера от частоты столкновений ион-нейтрала. Показано, что в столкновительной плазме электрический потенциал макрочастицы всегда имеет асимптотическое поведение кулоновского типа. Проведен анализ влияния столкновений ион-нейтрала на ионную силу сопротивления, которая действует на

движущуюся частицу. Показано, что ионная сила сопротивления меняет направление при уменьшении длины свободного пробега ионов. В случае, когда длина пробега ионов намного меньше длины Дебая (гидродинамический режим), ионная сила сопротивления направлена вдоль скорости движения частицы. Получена зависимость ионной силы сопротивления от скорости движения частицы в гидродинамическом режиме.

## НОВАЯ КНИГА

**Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Г. О. Кривов, К. О. Зворикін. — К.: КВЦ, 2012. — 896 с.**

Изложены основные решения и типовые схемы технологических процессов изготовления сварных конструкций. Рассмотрены общие вопросы технической подготовки производства. Приведено содержание основных технологических процессов сварочного производства, а также содержание технологических процессов производства типовых сварных конструкций, конструкций и негабаритных сооружений оболочечного типа, емкостей, работающих под давлением, сварных труб и трубопроводов, корпусных сварных конструкций транспортных сред, машиностроительных сварных конструкций. Приведены общие рекомендации по компоновке подразделений сварочного производства.

Учебник соответствует учебной программе кредитного модуля «Производство сварных конструкций» НТУУ «Киевский политехнический институт» и базируется на лекционном курсе, читаемом там.

Для студентов высших учебных заведений направления подготовки «Сварка», может быть полезным студентам других направлений и специальностей, а также инженерам, занимающимся технической подготовкой сварочного производства.





## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПАЙКА-2013»

С 10 по 12 сентября 2013 г. в Тольяттинском государственном университете прошла международная научно-техническая конференция «Пайка-2013». Это уже седьмая специализированная конференция по пайке высокого уровня (всероссийские, международные), проводившаяся в Тольятти. Это связано с тем, что в Тольяттинском политехническом институте, а затем в Тольяттинском государственном университете (ТГУ) с 1970 г. организована подготовка инженеров-сварщиков со специализацией по пайке. Цель конференции — повышение качества паяных соединений и расширение области применения пайки.

На конференции были представлены опубликованные в сборнике доклады из четырех стран (по мере убывания количества докладов): России, Украины, Германии и Белоруссии, в том числе совместные, подготовленные по итогам международного сотрудничества. Среди авторов — представители 12 городов, 22 предприятий и организаций. География слушателей еще шире — Москва, Подмосковье, Поволжье, Урал, Сибирь, Дальний Восток. 16 городов, более 25 предприятий и организаций. Тематика докладов включала оценку современного состояния и перспектив применения пайки, вопросы теории, технологии, свойств и возможностей использования новых материалов и оборудования для низко- и высокотемпературной пайки, применения информационных технологий, методов исследований и оценки качества паяных соединений и конструкций, подготовки специалистов по пайке.

Среди участников конференции были 8 докторов и более 20 кандидатов наук, технические и научные руководители предприятий, инженерно-технические работники, преподаватели, сотрудники и студенты ТГУ.

В течение трех дней работы конференции состоялись четыре заседания, а также многочисленные контакты в неформальной обстановке. Представленные доклады были актуальны, выслушаны с интересом и вниманием, вызвали вопросы и дискуссии.

Тематика конференции была достаточно разнообразна, однако в ней можно выделить несколько наиболее значимых направлений.

Так, проф. В. С. Новосадов (МГУПП, Москва) сделал три доклада, в которых изложил физико-химические основы контактных взаимодействий твердых и жидких фаз при пайке и жидкофазной технологии получения композитов. Эти исследования очень важны с точки зрения понимания сути происходящих при пайке процессов и оценке полученных результатов на практике.

Чл.-кор. НАН Украины В. Ф. Хорунов представил три доклада по пайке интерметаллидных сплавов на основе никеля и титана, два из которых являются плодом совместных исследований Института электросварки им. Е. О. Патона и ТГУ (проф. Б. Н. Перевезенцев и О. Г. Убираило). Третий доклад «Морфологические особенности структуры паяных соединений никелевых сплавов на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  (д-р техн. наук С. В. Максимова и др.) и доклад проф. А. И. Ковтунова и др. «Исследование процесса формирования на стали жаростойких покрытий системы никель-алюминий» удачно развили это направление. Интерметаллидные сплавы активно исследуются во всем мире и перспективны для применения, кроме горячего тракта газотурбинных двигателей, во многих отраслях промышленности.

Генеральным директором ООО «МИФИ-АМЕТО» канд. техн. наук В. Т. Федотовым с сотрудниками представлен ряд интересных докладов по разработке и применению быстрозакаленных (аморфных) припоев. В числе этих работ исследования в области пайки разнородных соединений первой стенки и дивертора ИТЭР, пайки керамики с металлами и др. «МИФИ-АМЕТО» двадцать лет работает на рынке припоев, и в настоящее время является основным поставщиком аморфных припоев в СНГ.

Несколько докладов было представлено специалистами НП «Союз профессиональных паяльщиков им. С. Н. Лоцманова» (Москва), которое работает под руководством проф. И. Н. Пашкова. В них были освещены различные аспекты паяльного производства России, что вызвало большой интерес у участников конференции.

Нельзя не отметить интересные доклады представителей Нижегородского государственного университета, посвященные изучению флюсовых систем для высоко- (Е. И. Герасимов и др.) и низкотемпературной (Н. А. Курников и др.) пайки алюминия. Эти работы перекликаются с исследованиями, проводимыми в ИЭС им. Е. О. Патона и в ряде ведущих фирм мира.

Два доклада было посвящено проблеме пайки с использованием дугового нагрева. В докладе представителей ОАО «АВТОВАЗ» и ТГУ произведена оценка применения технологии аргонодуговой пайки при производстве кузова автомобилей, а в докладе сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона показана возможность дуговой пайки различных материалов с применением припоев на основе цинка. Доклады вызвали большой интерес, особенно пайка цинковым припоем. К сожалению, не были представлены предусмотренные программой конференции докла-

ды из Германии, которые позволили бы обсудить эту проблему в более широком аспекте.

Большой интерес вызвал доклад по пайке титановых сплавов припоями системы (Ti-Zr-(Fe, Mn, Co)), разработанными в ИЭС им. Е. О. Патона (В. Ф. Хорунов и др.). Приведены структура и свойства соединений при пайке титановых сплавов различных классов в сравнении с таковыми при использовании известных припоев. Эти исследования были удачно дополнены докладом представителей ТГУ по пайке титана алюминиевыми припоями (О. В. Шашкин и др.).

Следует отметить большую активность сотрудников ТГУ, доклады которых доминировали на конференции. Ряд докладов был посвящен очень

важной проблеме — подготовке специалистов с высшим образованием различного профиля. Эта информация, безусловно, важна и для вузов нашей страны. Остальные доклады, безусловно, интересны и отражают огромный потенциал ТГУ в области пайки и смежных областях, но разнообразны по тематике, что затрудняет дать им обобщающую характеристику. Это же относится к ряду других докладов, представленных на конференции.

После окончания представления докладов состоялась дискуссия. Участники конференции высоко оценили как содержание докладов, так и организацию конференции.

А. Ю. Краснопевцев

УДК 621.791:061.2/4

## ОСЕННИЕ СВАРОЧНЫЕ ПРЕМЬЕРЫ 2013 г.

**16–21 сентября в Эссене** состоялась 18-я Международная выставка-ярмарка «Сварка и Резка» («Schweissen&Schneiden 2013»), которая проходит раз в четыре года и является крупнейшей в мире специализированной выставкой. На ней были представлены 1017 экспонентов из 40 стран, каждый четвертый из которых представлял зарубежные компании. Как и ожидалось, наибольшее количество участников было зарегистрировано от Германии (364 предприятия/организации). Второй страной по этому показателю оказался Китай (152), значительно опередивший Италию (88), США (45), Францию (31), Англию (28), Индию (19), Испанию (14), Турцию (14), Южную Корею (14), Швецию (13) и Чехию (11). Труднообъяснимым является факт участия всего лишь одного представителя от Японии. Выставку посетило около 55 тыс. специалистов из 130 стран, причем около 50 % из них из-за рубежа. Почти каждый второй знакомился с экспонатами не менее двух дней. Участники выставки отметили высокую ее посещаемость, в том числе и своих стендов, а также компетентность и многонациональность гостей. Более 60 % экспонентов отметили текущую экономическую ситуацию их компаний как благоприятную или очень благоприятную, а также были удовлетворены готовностью специалистов осуществлять торговые сделки. Организаторами выставки отмечено, что треть экспонентов заключили договора на поставку оборудования, расходных материалов прямо на выставке. В стоимостном выражении уровень отдельных продаж достигал суммы более 1 млн евро.

«Это подчеркивает, что выставка в Эссене дает мощный импульс развития сварочной отрасли» — подвел итог Galinnis, управляющий директор компании «Messe Essen». — Важные тенденции, проявившиеся во время выставки, — автоматизация и



интеллектуализация производства с акцентом на эффективность, экономичность и устойчивость процессов соединения, разки и наплавки».

Впервые в дни проведения выставки в Эссене состоялась 66-я ассамблея МИСа, в которой приняли участие более 600 ученых и специалистов из 47 стран. Это предоставило делегатам ассамблеи прекрасную возможность познакомиться с последними достижениями. В рамках ассамблеи МИСа в первые два дня состоялась международная конференция на тему «Автоматизация сварки».

«Успех прошедшей выставки является результатом партнерства между DVS и «Messe Essen», которое длится более 60 лет», — подвел итоги генеральный директор DVS Kusters. — Даже сейчас мы с нетерпением ждем следующей ведущей в мире



выставки в 2017 г. (18–23 сентября)». 93 % экспонентов и посетителей прошедшей выставки выразили желание посещать наиболее важные мероприятия этого сектора производства в любой точке мира. Следующие ориентиры: «Сварка 2014» (г. С.-Петербург, 24–27 июня); «Сварка и резка 2014» (г. Пекин, 10–13 июня); «Сварка и резка 2014» (г. Мумбаи, 28–30 октября); «Сварка и резка 2015» (г. Дубай, 10–13 января); «Сварка и резка 2015» (г. Москва, июнь).

**С 8 по 11 октября 2013 г. в Москве** в КВЦ «Сокольники» проходила 13-я Международная специализированная выставка «Weldex/Россварка 2013». Эта выставка сварочной продукции — крупнейшая в России и с каждым годом продолжает расти. Объяснением этому служит то, что размеры российского рынка колоссальны, большинство промышленных производств нуждается в качественно новой модернизации, усовершенствовании и автоматизации сварочных процессов.

Несомненно важным также является традиционно активное посещение выставки специалистами из многих регионов России, представлявших такие отрасли, как машиностроение, строительство, энергетику, нефтегазовый комплекс и др.

На выставке был представлен широкий спектр оборудования, материалов и современных технологий для сварки, резки, наплавки, пайки и обработки поверхностей. Основные разделы выставки включали демонстрацию:

- оборудования и технологий для всех видов сварки, наплавки и пайки;
- оборудования и технологии для термической обработки;

- материалов для сварки, резки, наплавки, напыления, пайки;
- средств и методов защиты;
- контроля качества сварочных соединений;
- инструментов и приспособлений для сварки;
- научных разработок в области сварки.

В выставке приняли участие 254 компании из 18 стран мира. Посетители могли ознакомиться с оборудованием и материалами компаний ESAB (Швеция), «Lincoln Electric» (США), «Kemppi» (Финляндия), ИТС-СЭЛМА (Россия–Украина), «Merkle» (Германия), «Hyundai Welding K<sup>o</sup> Ltd.» (Южная Корея), «Kuka Robotics» (Германия), «Polysoude» (Франция) и многими другими предприятиями из России, Украины, США, Германии, Турции, Китая, Австрии, Италии и других стран. Впервые в выставке приняли участие фирмы «Boehler Welding», ОАО «НИКИМТ-Атомстрой», «Рематек», «Cloos» и др.

Выставка продемонстрировала уникальную возможность своими глазами увидеть оборудование в действии, получить консультации специалистов и





выбрать лучшие предложения по специальным выставочным ценам. Проведение таких масштабных мероприятий, как выставка «Weldex/Россварка», оказывает огромное влияние на развитие крупного и малого бизнеса, способствует расширению и углублению международных контактов, межотраслевых связей, стимулирует повышение конкурентоспособности промышленности.

Кроме того, выставка позволяет получить ответы на ключевые вопросы участников и посетителей. Активное обсуждение актуальных вопросов отрасли, новые подходы к сварочному процессу, поиск инновационных решений — это движущая сила выставки «Weldex/Россварка». Обширная деловая программа выставки включала проведение конференций, семинаров и презентаций. Среди них:

научно-практическая конференция «Автоматизация и механизация процессов сварки и резки в транспортном машиностроении» (организаторы: РНТСО, Московский межотраслевой альянс главных сварщиков (ММАГС), «Элсвар»);

презентация инверторной машины для контактной точечной сварки TECNA (Италия) (организатор: ООО «Рутектор»);

форум «Профессиональные стандарты и сертификация квалификации в сварке» (организатор: МАТИ);

научно-практическая конференция в формате «Клуба деловых встреч: Сварочные технологии,



оборудование и материалы для обновления и подъема промышленного производства» (организаторы: ММАГС, «Элсвар»);

конференция «Напыление и наплавка — новые перспективы современных технологий. Как достичь невозможного» (организатор: ЗАО «Плакарт»);

научно-технический семинар «Сварка и резка 2013: особенности сварки алюминия, микросварка металлов, автоматизация сварочных процессов, новые технологии плазменной резки» (организатор: ООО «Вебер Комеханикс»);

семинар «Сварка трубопроводов» (организатор: voestalpine «Boehler Welding»);

семинар «Порошковые проволоки» «Boehler Welding» (организатор: voestalpine «Boehler Welding»);

семинар «Ремонт и восстановление сварочными материалами ИТР Maintenance» (организатор: voestalpine «Boehler Welding»);

рабочая встреча главных сварщиков вагоностроительных заводов (организатор: ООО «АПС РАДИС»);

семинар «Энергосбережение и удаление вредных выбросов в сварочном производстве» (организатор: ЗАО «Промышленная группа «Инвент»);

конкурсы «Лучший сварщик 2013» и «Лучший инженер (ученый) в области сварки 2013» (организаторы: MVK, «Элсвар»);

конкурс «Мисс Сварка Мира 2013» (организатор MVK, «Элсвар»).

В рамках выставки состоялось заседание открытого собрания ассоциации «Электрод» предприятий стран СНГ, объединяющей свыше 25 организаций. На нем были обсуждены текущие задачи, приняты новые предприятия в члены ассоциации, а также подписано соглашение о сотрудничестве между ассоциацией «Электрод» и РНТСО.

В ходе выставки в течение четырех дней в одном из холлов демонстрировались художественно-декоративные изделия, выполненные с использованием методов сварки иковки.

По мнению многих специалистов, прошедшая выставка «Weldex/Россварка» продемонстрировала высокий интерес посетителей, способствовала успешной реализации коммерческих планов, помогла завязать множество полезных контактов для развития бизнеса.

Следующая выставка «Weldex/Россварка» будет проходить 7–10 октября 2014 г. в КВЦ «Сокольники».

**15–17 октября 2013 г. в ВЦ «КиевЭкспоПлаза»** состоялся Десятый специализированный промышленный форум «Патон Экспо. Промышленные выставки — 2013». Одновременно с форумом проходили выставки «Наука. Инновации. Технологии — 2013» и КТТС — 2013.

Наибольший интерес у посетителей вызвала экспозиция по сварочной тематике. Стенды компаний «Донмет», «ПлазмаТек», ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Па-



тона, «Фрунзе Электрод», ТД «Лосиноостровский электродный завод» и др. продемонстрировали широкий ассортимент продукции, позволяющий решать многие производственные задачи.

Отдельно стоит отметить стенд ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона, где был представлен широкий диапазон современного сварочного оборудования — инверторов (ВДИ-160 и др.), полуавтоматов (ПСИ-200М и др.), сварочных тракторов (АД-277) и пр.

Посетителей также заинтересовал стенд Опытного конструкторско-технического бюро ИЭС им. Е. О. Патона, где были представлены установки А-1568М и А-1569М1 для автоматической дуговой сварки под флюсом кольцевых швов роторов в глубокую разделку с АСУ СУ-410.

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины представил последние разработки в области строительства (контактная стыковая сварка арматуры железобетона) и железнодорожного транспорта (новое поколение рельсосварочных машин).

На стендах ГК «Укртрансгаз» и Государственной администрации железнодорожного транспорта Украины были продемонстрированы современные достижения и перспективы развития важнейших отраслей промышленности страны — трубопроводного и железнодорожного транспорта.

Не разрушающий контроль был представлен коллективным стендом Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, компаниями «Сантел Газнефтьавтоматика» (Россия), «Технотест Инжиниринг», «Ультракон» и др.

В рамках форума состоялись научно-практические мероприятия:

— семинар «Методы и средства диагностики и контроля технического состояния трубопроводных систем различного диаметра»;

— конференция «Пути повышения эксплуатационной безопасности и надежности железнодорожного транспорта на основе инновационных технологий сварки и родственных процессов».

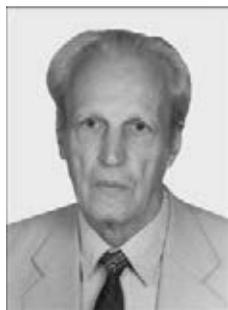
Специалисты ГК «Укртрансгаз» и Государственной администрации железнодорожного транспорта Украины отметили высокий научно-прикладной уровень представленных докладов.

Форум «Патон Экспо 2013» — это традиционное место встречи производителей с потребителями промышленной продукции и технологий, где можно обменяться мнениями и найти пути решения своих задач.

В. Н. Липодаев,  
А. Т. Зельниченко

## НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

### О. И. ГУЩЕ — 90



Олегу Иосифовичу Гуще, доктору технических наук, профессору, исполнилось 90 лет.

О. И. Гуща родился 25 ноября 1923 г. в г. Бровары Киевской области. После окончания в 1948 г. Киевского института киноинженеров по специальности инженер-электрик работал техническим руководителем Ростовского-на-Дону областного киноремобеспечения. В 1951–1961 гг. работал в Институте горных дел АН УССР в отделе прочности горных машин и сооружений инженером и главным конструктором.

С 1961 г. О. И. Гуща работал в ИЭС им. Е. О. Патона сначала старшим инженером ОКТЬ, а с 1962 г. — старшим научным сотрудником отдела прочности сварных конструкций. Занимался разработкой новых методов измерения остаточных напряжений, изучением эксплуатационных нагрузжений, оценкой долговечности и надежности работы сварных конструкций.

При непосредственном участии О. И. Гущи в содружестве с академиком НАН Украины А. Н. Гузем и доктором физ.-мат. наук П. Г. Махортом был разработан новый метод измерения остаточных напряжений в сварных соединениях, базирующийся на эффекте акустоупругости. Выведены соотношения, указывающие на зависимость скоростей распространения акустических волн от напряжений в твердых телах. Разработаны научные основы определения одно-, двух- и трехосевых напряжений, в том числе остаточных сварочных напряжений без разрушения объекта. В соавторстве с НИИ «Квант» (Киев) создана аппаратура, позволяющая получать необходимые измерения по новому методу определения напряжений. Создание такого метода дало возможность получить большой объем данных о напряженном состоянии сварных конструкций для оценки их работоспособности и надежной эксплуатации.

О. И. Гуща — автор 115 научных работ, в том числе трех монографий в соавторстве и 18 изобретений.

В настоящее время О. И. Гуща на пенсии.



## К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Г. Л. ПЕТРОВА

В этом году исполнилось 100 лет со дня рождения видного ученого в области металлургии и сварки, доктора технических наук, профессора Г. Л. Петрова.

Георгий Львович Петров родился в 1913 г. В 1934 г. окончил Ленинградский электросварочный институт (ныне факультет в ЛПИ им. М. И. Калинина), с которым он связал всю свою дальнейшую творческую жизнь. В его стенах в 1940 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1960 г. — докторскую.

В годы Великой Отечественной войны Г. Л. Петров принимал активное участие в военных действиях на фронтах, прошел славный путь от красноармейца до офицера Советской Армии.

После демобилизации Георгий Львович вновь в ЛПИ им. М. И. Калинина занимался преподавательской и научно-исследовательской работой. Как преподаватель Г. Л. Петров пользовался большим авторитетом среди студентов и коллег по работе, часто выступал с докладами перед студенческой аудиторией, в том числе вел большую методическую работу и в вузах других городов. С 1965 г. Г. Л. Петров заведовал кафедрой, научный коллектив которой под его руководством стал ведущим в стране среди вузов.

Крупный советский ученый Г. Л. Петров известен в первую очередь своими трудами по технологии сварочного производства. С его именем связаны блистательные исследования по изучению неоднородности металла сварных соединений жаропрочных и специальных сталей и сплавов, ее влияния на качество сварки, а также поведения диффу-

зионно-подвижного водорода в металле сварных швов, особенностей кристаллизации в условиях сварки, созданию расчетных методов легирования металла при ручной и автоматической сварке; им выполнены исследования ряда процессов при кислородной резке.

Г. Л. Петровым было опубликовано свыше 250 научных работ, среди них такие широко известные среди специалистов, как монографии «Неоднородность металла сварных соединений», «Сварочные материалы», учебник «Теория сварочных процессов». Пять его книг переведены и переизданы за рубежом.

Большую работу Г. Л. Петров проводил по подготовке научных кадров. Свыше 50 кандидатов наук подготовлены непосредственно Георгием Львовичем, 12 докторских диссертаций были выполнены под его научным руководством и в тесном контакте с ним.

Г. Л. Петров поддерживал постоянную связь с работниками промышленности, оказывая заводам и научным учреждениям помощь в решении ряда важных вопросов.

Г. Л. Петров вел большую общественную работу. В течение многих лет являлся членом Научного и Координационного совета по сварке, членом Национального Комитета СССР по сварке, членом секции сварки Ленинградского ОП НТО Машпрома, вел другую общественную работу.

За заслуги на фронтах Великой Отечественной войны и труд в мирное время Г. Л. Петров награжден орденами Отечественной войны 1-й и 2-й степеней, Красной Звезды и многими медалями.



**Межотраслевой учебно-аттестационный центр  
Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**



## Программы профессиональной подготовки на 2014 г.

Шифр курса	Наименование программы	Продолжительность	Сроки проведения
<b>1. Повышение квалификации инженерно-технических работников</b> (с аттестацией на право технического руководства сварочными работами при изготовлении сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)			
101	Техническое руководство сварочными работами на объектах, за которыми осуществляется государственный надзор	подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)
102		переаттестация	18 ч
103	Расширение области аттестации руководителей сварочных работ		6 ч
104	Техническое руководство сварочно-монтажными работами при строительстве и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)
105		переаттестация	1 неделя (32 ч)
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)
107		переаттестация	22 ч
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.	72 ч	март
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)	3 недели (112 ч)	декабрь
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС	8 ч	май, декабрь
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке	6 ч	ноябрь
117	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:	со стажем 3 года	32 ч
118		со стажем 6 и более лет	20 ч
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке:	со стажем 3 года
120		со стажем 6 и более лет	20 ч
121	специалистов по техническому контролю	специалистов по техническому контролю	16 ч
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	36 ч
123		специалистов по охране труда	16 ч
130	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	453 / 128 ч <sup>1</sup>
132		Международный технолог по сварке	372 / 91 ч <sup>1</sup>
134		Международный специалист по сварке	248 / 60 ч <sup>1</sup>
136		Международный инспектор по сварке	полного уровня
137	стандартного уровня		170 ч
138	базового уровня		115 ч
139, 149		для специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер по сварке»	76/ 78
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)
142		переаттестация	22 ч
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений	повышение квалификации и аттестация	2 недели (72 ч)
144		переаттестация	20 ч
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов	подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)
146		переаттестация	22 ч
147	Повышение квалификации руководителей и специалистов рельсосварочных поездов	36 ч	июнь
151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
152	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей методами наплавки		
<b>Тематические семинары</b> (возможно проведение на территории заказчика)			
161	Состояние нормативно-технической документации в области сварочного производства, тенденции и перспективы	2 дня (16 ч)	март, июнь

162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов	2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь
163	Современное оборудование и состояние нормативной документации в области сварки труб из термопластов	1 день (8ч)	по согласованию с заказчиком
164	Подтверждение соответствия, декларирование продукции сварочного производства		сентябрь, октябрь
165	Новые технологии профессиональной подготовки сварщиков и дефектоскопистов		

## 2. Повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки

201	Организация профессионально-практической подготовки сварщиков по модульной технологии	3 недели (112 ч)	постоянно, по согласованию с заказчиком
202	Организация профессионально-теоретической подготовки сварщиков по модульной технологии	2 недели (72 ч)	
203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	4 недели (152 ч)	
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка» с присвоением квалификации «Международный специалист по сварке»	2,5 недели (100 ч)	
206	Повышение квалификации мастеров производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	186 ч	

## 3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий

(с присвоением квалификации в соответствии с национальными и международными требованиями)

### Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:

301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	9 недель (352 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки	3 недели (116 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	3 недели (112 ч)	
305	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	3 недели (112 ч)	
306	автоматической дуговой сварки под флюсом	3 недели (112 ч)	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	3 недели (112 ч)	
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)	5 недель (196 ч)	

### Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:

310	Международный сварщик угловых швов	72 - 230 ч <sup>1</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
312	Международный сварщик плоских соединений	72 - 360 ч <sup>1</sup>	
315	Международный сварщик труб	72 - 560 ч <sup>1</sup>	
318	Международный практик-сварщик	35 - 153 ч <sup>1</sup>	

### Курсовая переподготовка СВАРЩИКОВ:

320, 321	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	152 / 76 ч <sup>2</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
322	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	76 ч / 112 ч / 152 ч	
325	газовой сварки	76 ч	
326	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	72 ч	
327	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	76 ч	
328	автоматической дуговой сварки под флюсом	76 ч	по согласованию с заказчиком
329	электрошлаковой сварки	76 ч	

### Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:

330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
331	ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)	
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
333	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)	
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	
335	автоматической дуговой сварки под флюсом	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	

### Курсовая подготовка дефектоскопистов и контролеров:

340	ультразвукового контроля	196 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
341	рентген и гамма контроля	188 ч	
342	магнитного контроля	180 ч	
343	контролеров неразрушающего контроля	196 / 72 ч <sup>3</sup>	
345	контролеров сварочных работ	154 ч	

### Целевая курсовая подготовка дефектоскопистов для железнодорожного транспорта:

350	магнитного контроля	120 ч	по согласованию с заказчиком
351	ультразвукового контроля	160 ч	

352	по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов	160 ч	по согласованию с заказчиком
<b>Целевая подготовка и подтверждение квалификации:</b>			
362	метализаторов по нанесению упрочняющих и защитных покрытий на металлы	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)
366	специалистов Укрзалізниця по поверхностной закалке колесных пар на установке высокотемпературной закалки УВПЗ - 2М»	72 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком

#### 4. Аттестация персонала сварочного производства

401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами Госгорпромнадзора (НПАОП 0.00-1.16-96) и стандартами ДСТУ 2944, ДСТУ ISO 9606-2,3,4,5	72 ч	постоянно	
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96	24 ч		
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ 2944, ДСТУ ISO 9606-2,3,4,5	32 ч		
404	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1 (EN 287-1)	112 ч <sup>2</sup>		
405		72 ч <sup>2</sup>		
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1 (EN 287-1)	24 ч		
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии с стандартом ISO 14732	2 недели (72 ч)		
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком	
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)	32 ч		
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки арматуры	2 недели (72 ч)		
414	Аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		проводится по окончании курса 309	
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)	32 ч	ежеквартально	
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно НПАОП 0.00-1.63-13	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I yr) ч <sup>4</sup>	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II yr) ч <sup>4</sup>	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I yr) ч <sup>4</sup>	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II yr) ч <sup>4</sup>	
433			16 / 20 / 30 (I yr) ч <sup>4</sup>	
436	визуально-оптический контроль	20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II yr) ч <sup>4</sup>		
441	Специальная подготовка и аттестация дефектоскопистов по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов (согласно РД 07-09-97)	подготовка и аттестация	76 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
442		переаттестация	36 ч	
443	Специальная подготовка и специалистов по контролю качества защитных покрытий	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
444		переаттестация	32 ч	
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732	32 ч	февраль	
454	Специальная подготовка и аттестация газорезчиков	газовой резки	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
455		ручной и механизированной воздушно-плазменной резки	3 недели (112 ч)	

#### 5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной и механизированной дуговой сварки	4 – 8 ч <sup>5</sup>	по согласованию с заказчиком
505	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	4 – 16 ч <sup>5</sup>	
510	Практические тренинги по различным способам сварки	16 – 32 ч <sup>5</sup>	

<sup>1</sup> - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки, опыта работы в сварочном производстве, выбранного процесса и группы материалов (для сварщиков).

<sup>2</sup> - Продолжительность обучения зависит от специализации и уровня квалификации.

<sup>3</sup> - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

<sup>4</sup> - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

<sup>5</sup> - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

По просьбе заказчиков возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень. На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет. Стоимость обучения определяется при заключении договора. Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11 Тел. (044) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09, Факс (044) 456-48-94; E-mail: paton\_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua

## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЗА 2013 г.

## ПЕРЕДОВИЦА

95-летие Национальной академии наук Украины и ее президента Бориса Евгеньевича Патона № 10–11

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**А**ЛЕШИН Н. П. Современные информационные автоматизированные системы акустического контроля сварки № 10–11

АХОНИН С. В., БЕЛОУС В. Ю., МУЖИЧЕНКО А. Ф., СЕЛИН Р. В. Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава ВТ23 при сварке ТИГ № 3

**Б**ЕРНАЦКИЙ А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) № 12

БОРИСОВ Ю. С., ВИГИЛЯНСКАЯ Н. В., ДЕМЬЯНОВ И. А., ГРИЩЕНКО А. П., МУРАШЕВ А. П. Исследование влияния режимов электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавных покрытий № 12

БОРИСОВ Ю. С., ВИГИЛЯНСКАЯ Н. В., ДЕМЬЯНОВ И. А., ГРИЩЕНКО А. П., МУРАШОВ А. П. Исследование диспергирования разнородных проволоочных материалов в процессе электродугового напыления № 2

БОРИСОВ Ю. С., ДЕМЧЕНКО В. Ф., ЛЕСНОЙ А. Б., ХАСКИН В. Ю., ШУБА И. В. Численное моделирование теплообмена и гидродинамики при лазерно-плазменной обработке металлических материалов № 4

БОРИСОВ Ю. С., КУЗНЕЦОВ М. В., ВОЛОС А. В., ЗАДОЯ В. Г., КАПИТАНЧУК Л. М., СТРЕЛЬЧУК В. В., КЛАДКО В. П., ГОРБАНЬ В. Ф. Магнетронные нанокompозитные покрытия  $nc-TiC/a-C$  № 7

БРЫЗГАЛИН А. Г. Расчет параметров обработки взрывом для снижения остаточных напряжений в кольцевых швах трубопроводов № 8

**В**ЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., МИЛЕНИН А. С., ПИВТОРАК Н. И. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях № 9

ВИЛАРИНХО ЛОУ, ВИЛАРИНХО ЛАУРА. Современные исследования и перспективные разработки сварочных технологий в исследовательском центре «Лапрозолд-Бразилия» № 10–11

ВРЖИЖЕВСКИЙ Э. Л., САБОКАРЬ В. К., АХОНИН С. В., ПЕТРИЧЕНКО И. К. Влияние локальной термической обработки при ЭЛС титановых сплавов с силицидным упрочнением на механические свойства металла швов № 2

**Г**АЙВОРОНСКИЙ А. А. Влияние диффузионного водорода на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокоуглеродистой стали № 5

ГДОУТОС Е. Механическое поведение и разрушение слоистых конструкций № 10–11

ГОЛОВКО В. В., ПОХОДНЯ И. К. Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей № 6

ГОНЧАРОВ И. А., ГАЛИНИЧ В. И., МИЩЕНКО Д. Д., ШЕВЧУК Р. Н., ДУЧЕНКО А. Н., СУДАВЦОВА В. С. Способы управления активностью оксида кремния в шлаковых расплавах сварочных флюсов № 2

**Ж**АРДИ А. Расчетное моделирование и экспериментальные исследования процессов переплава № 10–11

**И**ЛЮШЕНКО В. М., НОВОСЕЛЬЦЕВ Ю. Г., БУСЫГИН С. Л. Металлургические особенности плазменно-дуговой сварки хромовой бронзы № 4

**К**ОЗУЛИН С. М., ЛЫЧКО И. И., ПОДЫМА Г. С. Структура и свойства сварных соединений стали типа 35Л, выполненных многослойной электрошлаковой сваркой № 8

КОСТИН В. А., ГРИГОРЕНКО Г. М., СОЛОМИЙЧУК Т. Г., ЖУКОВ В. В., ЗУБЕР Т. А. Микроструктура металла ЗТВ соединений высокопрочной конструкционной стали WELDOX 1300 № 3

КРИВЦУН И. В., КРИКЕНТ И. В., ДЕМЧЕНКО В. Ф. Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом № 7

КУДРЯВЦЕВ Ю., КЛЕЙМАН Я. Регулирование остаточных сварочных напряжений: измерения, анализ усталости, упрочняющие обработки № 10–11

КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И., ЧВЕРТКО П. Н., СЕМЁНОВ Л. А., ГУЩИН К. В., САМОТРСОВ С. М. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия № 7

КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И., ШВЕЦ В. И., ДИДКОВСКИЙ А. В., АНТИПИН Е. В., КАПИТАНЧУК Л. М. Дефекты соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением № 9

КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И., ШВЕЦ Ю. В., ЗАГАДАРЧУК В. Ф., ШВЕЦ В. И., ХОМЕНКО В. И., ЖУРАВЛЕВ С. И., СУДАРИН А. Я. Технология термической обработки соединений труб из стали класса прочности К56, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением № 2

**Л**ОБАНОВ Л. М., ПАЩИН Н. А., МИХОДУЙ О. Л. Электродинамическая правка элементов тонколистовых сварных конструкций № 9

ЛОБАНОВ Л. М., ПАЩИН Н. А., ТИМОШЕНКО А. Н., МИХОДУЙ О. Л., ГОНЧАРОВ П. В. Влияние предварительного деформирования и электродинамической обработки на напряженное состояние кольцевых сварных соединений сплава АМгб № 8

ЛОБАНОВ Л. М., ПОЗНЯКОВ В. Д., МАХНЕНКО О. В. Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа № 7

**М**АКСИМОВА С. В., ХОРУНОВ В. Ф., ВОРОНОВ В. В. Влияние величины зазора и исходного состояния припоя на структурообразование паяных соединений титанового сплава № 3

МАРКАШОВА Л. И., ПОКЛЯЦКИЙ А. Г., КУШНАРЕВА О. С. Влияние способов сварки на структуру и механические свойства соединений алюминиевого сплава 1460 № 3

МАРКАШОВА Л. И., ТЮРИН Ю. Н., КОЛИСНИЧЕНКО О. В., ВАЛЕВИЧ М. Л., БОГАЧЕВ Д. Г. Влияние структурных параметров на механические свойства стали Р6М5 при упрочняющей поверхностной обработке № 12

МАРЧЕНКО А. Е., СКОРИНА Н. В. Влияние технологических факторов изготовления низководородных электродов на содержание водорода в наплавленном металле № 8

МАХНЕНКО В. И. Проблемы экспертизы современных сварных конструкций ответственного назначения № 5

МАХНЕНКО В. И., МАХНЕНКО О. В., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., ПИВТОРАК Н. И. Учет порообразования при термической обработке сварных узлов из сталей, склонных к образованию трещин отпуски № 3

МАХНЕНКО В. И., ОЛЕЙНИК О. И., ШЕКЕРА В. М. Определение контактного давления усиливающей муфты при ремонте трубопроводов с поверхностными дефектами № 6

МАХНЕНКО О. В., МИРЗОВ И. В. Исследование напряженно-деформированного состояния сварных конструкций из аустенитной стали в условиях радиационного облучения № 1

МАХНЕНКО О. В., МУЖИЧЕНКО А. Ф., ПРУДКИЙ И. И. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сварных стрингерных панелей из титанового сплава BT20 № 2

МАХНЕНКО О. В., ПРУДКИЙ И. И. Информационные системы выбора технологических параметров для дуговой сварки (Обзор) № 4

МИЛЕНИН А. С. К вопросу планирования ремонта магистральных трубопроводов под давлением на основе результатов внутритрубной диагностики № 5

**НА**ЗАРЕНКО О. К., ГУРИН О. А., БОЛГОВ Э. И. Особенности токовой защиты источников питания для электронно-лучевой сварки № 1

**О**КАМОТО Я., НАКАШИБА С., САКАГАВА Т., ОКАДА А. Микросварка алюминиевых сплавов пульсирующим лазером NdYAG и непрерывным диодным лазером № 10–11

**ПА**НТЕЛЕЙМОНОВ Е. А., НЫРКОВА Л. И. Применение индукционной термообработки для обеспечения коррозионной стойкости сварных труб из нержавеющей стали № 6

ПАТОН Б. Е. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона для современной энергетики № 10–11

ПАТОН Б. Е., КРИВЦУН И. В., МАРИНСКИЙ Г. С., ХУДЕЦКИЙ И. Ю., ЛАНКИН Ю. Н., ЧЕРНЕЦ А. В. Сварка, резка и термическая обработка живых тканей № 10–11

ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ Ю. М., КОВТУН В. А. Основы технологии электроконтактного спекания наноструктурированных металлополимерных покрытий триботехнического назначения № 10–11

ПОЗНЯКОВ В. Д., ЖДАНОВ С. Л., МАКСИМЕНКО А. А., СИНЕОК А. Г., ГЕРАСИМЕНКО А. М. Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б № 4

ПОХМУРСКИЙ В. И., СТУДЕНТ М. М., ПОХМУРСКАЯ А. В., РЯБЦЕВ И. А., ГВОЗДЕЦКИЙ В. М., СТУПНИЦКИЙ Т. Р. Газообразивная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металлизацией № 6

ПОХОДНЯ И. К., ИГНАТЕНКО А. В., ПАЛЬЦЕВИЧ А. П., СИНЮК В. С. Индуцированные водородом холодные трещины в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей (Обзор) № 5

**Р**ЫБАКОВ А. А., СЕМЕНОВ С. Е., ФИЛИПЧУК Т. Н. Свойства металла шва двусторонних сварных соединений труб из микролегированной стали повышенной прочности № 5

РЫБАКОВ А. А., ФИЛИПЧУК Т. Н., ГОНЧАРЕНКО Л. В. Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра и меры их предупреждения № 4

РЫБАКОВ А. А., ФИЛИПЧУК Т. Н., ДЕМЧЕНКО Ю. В. Оптимизация химического состава и структуры металла ремонтных швов при исправлении дефектов в сварных соединениях труб с применением многослойной сварки № 12

РЫБАКОВ А. А., ФИЛИПЧУК Т. Н., КОСТИН В. А., ЖУКОВ В. В. Влияние химического состава микролегированной стали и скорости охлаждения металла ЗТВ сварных соединений труб на его структуру и ударную вязкость № 9

**С**КАЛЬСКИЙ В. Р., ЛЯСОТА И. Н., СТАНКЕВИЧ Е. М. Особенности сигналов акустической эмиссии при оценке механизма разрушения сварных соединений алюминиевых сплавов № 1

СКУБА Т. Г., ДОЛИНЕНКО В. В., КОЛЯДА В. А., ШАПОВАЛОВ Е. В. Алгоритм технологической адаптации для автоматизированной многопроходной сварки МИГ/МАГ изделий с переменной шириной разделки кромок № 1

СОМОНОВ В. В., БЕМ Ш., ГАЙЕР М., БЕРТЕЛЬСБЕК Ш. Влияние индукционного нагрева на предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов № 4

**Ф**ОЛЬПП Й., ГАТЦЕН М., ФОЛЛЕРТСЕН Ф. Аналитическая модель динамики парогазового канала при лазерной сварке с глубоким проплавлением № 3

**Х**ОРУНОВ В. Ф., ЗВОЛИНСКИЙ И. В., МАКСИМОВА С. В. Дуговая пайка низкоуглеродистых сталей № 4

**Ч**ЕРНОБАЙ С. В. Сварка сплавов алюминидов титана (Обзор) № 8

ЧЕРНЯК Я. П. Разработка порошковой проволоки ферритного класса для наплавки деталей из высокоуглеродистых сталей № 1

ЧИГАРЕВ В. В., КОВАЛЕНКО И. В. Влияние остаточных напряжений в сварных соединениях двухслойных сталей на эксплуатационную надежность металлоконструкций № 12

**Ю**ЩЕНКО К. А., ГАХ И. С., ЗАДЕРИЙ Б. А., ЗВЯГИНЦЕВА А. В., КАРАСЕВСКАЯ О. П. Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов № 5

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

**Б**ЕЛОЕВ М., ХОМЕНКО В. И., КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И. Анализ и выбор сварочных технологий при строительстве магистральных трубопроводов большого диаметра № 10–11

БРУНС К., МЮЛЛЕР Т., ВИБЕ Й., ГЕРМАНН Й., КРАНЦ Б., РОЗЕРТ Р. Влияние сварочного нагрева на усталостную прочность полых конструкций из высокопрочных мелкозернистых сталей № 7

**Г**АВРИШ П. А., ШЕПОТЬКО В. П. Влияние конструктивных особенностей сварных узлов перегружателя на его работоспособность № 12

ГОЛОБОРОДЬКО Ж. Г. Опыт Херсонского судостроительного завода по применению плазменной резки № 2

ГОЛОБОРОДЬКО Ж. Г., ДРАГАН С. В., СИМУТЕНКОВ И. В. Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных сталей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода № 6

ГОРЫНИН И. В. Инновационные технологии в области конструкционных сталей и их сварки № 10–11

ГУАНЬ ЦЯО. Комплексное аддитивное производство на основе технологий сварки и соединений № 10–11

**Д**Е А., ДИБРОЙ Т. Последние достижения в сварке трением с перемешиванием № 10–11

ДЕНИСОВ И. В., ПЕРВУХИН Л. Б. Особенности сварки взрывом стали с чугуном № 7

ДИМЛАЙ В., МУДЖ П., ДЖЕКсон П., ТАТ ХИН ГАН, СУА С. Неразрушающий контроль конструкционной целостности элементов резервуара № 10–11

ДОБРУШИН Л. Д., ПЕКАРЬ Е. Д., БРЫЗГАЛИН А. Г., ИЛЛАРИОНОВ С. Ю. Метод измерения динамических деформаций при сварке взрывом № 5

ДУБ А. В. Перспективные технологии создания высоконадежных изделий из конструкционных сталей для базовых отраслей промышленности № 10–11

- КАБЛОВ Е. Н., ОСПЕННИКОВА О. Г., ЛОМБЕРГ Б. С.** Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего № 10–11
- КАЛЕКО Д. М.** Приварка стальных шпилек к алюминиевым листам № 8
- КНЫШ В. В., КЛОЧКОВ И. Н., БЕРЕЗИН И. В.** Повышение сопротивления усталости нахлесточных соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, выполненных сваркой плавлением № 3
- КОЛОМИЙЦЕВ Е. В.** Коррозионная стойкость сварных соединений судокорпусных материалов № 4
- КОРОТКОВ В. А.** Влияние остаточных напряжений при наплавке на закрепление цапф в корпусе мельницы № 9
- КОУЛ Н., ВЕБЕР Дж., ПФАРР М., ХЕРНАНДЕЗ Д.** Привлечение и подготовка руководящего персонала в области сварки и пайки № 10–11
- КРАВЧУК Л. А., КУШНЕРЕВ А. В., КОЖУКАЛО В. И.** Модернизация электронно-лучевой сварочной установки ЭЛУ-20 № 4
- КРИВЦУН И. В., БУШМА А. И., ХАСКИН В. Ю.** Гибридная лазерно-плазменная сварка нержавеющей стали № 3
- КУЗНЕЦОВ В. Д., СТЕПАНОВ Д. В., МАКОВЕЙ В. А., ЧЕРНЯК Я. П.** Износостойкость наплавленного металла типа углеродистых и хромомарганцевых сталей в условиях сухого трения скольжения металла по металлу № 6
- КУСКОВ Ю. М., БОГАЙЧУК И. Л., ЧЕРНЯК Я. П., ЕВДОКИМОВ А. И.** Электрошлаковая наплавка чугуна № 8
- ЛИТВИНЕНКО С. Н., ШАПОВАЛОВ К. П., САВЧЕНКО И. С., КОСИНОВ С. Н., ЮЩЕНКО К. А., ЛЫЧКО И. И., КОЗУЛИН С. М.** Системы управления процессом мониторинга режимов — важные факторы обеспечения качества при ЭШС металла большой толщины № 12
- ЛОБАНОВ Л. М., КИРЬЯН В. И.** Шестьдесят лет цельносварному мосту им. Е. О. Патона и № 12
- МАКСИМОВ С. Ю., ЛЯХОВАЯ И. В.** Мокрая подводная сварка низколегированных сталей повышенной прочности № 8
- МАХЛИН Н. М., ПОПОВ В. Е., ФЕДОРЕНКО Н. С., БУРБА А. В., ПЫШНЫЙ В. М., ДЮКОВ В. А., ГОНТАРЕВ В. Б.** Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении чехлов нейтронных измерительных каналов ядерных реакторов № 6
- НЕСТЕРЕНКОВ В. М., КРАВЧУК Л. А., АРХАНГЕЛЬСКИЙ Ю. А.** Механические свойства соединений жаропрочных сталей марок 10X12M, 10X9MФБА, выполненных электронно-лучевой сваркой № 9
- НЕСТЕРЕНКОВ В. М., КРАВЧУК Л. А., АРХАНГЕЛЬСКИЙ Ю. А., БОНДАРЕВ А. А.** Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке жаропрочных сталей марок 10X9MФБА и 10X12M № 6
- ПАТОН Б. Е., ЛЫЧКО И. И., ЮЩЕНКО К. А., СУПРУН С. А., КОЗУЛИН С. М., КЛИМЕНКО А. А.** Плавление электрода и основного металла при электрошлаковой сварке № 7
- ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ Е. Ф., РЯБЦЕВ И. А.** Плазменно-порошковая наплавка штоков энергетической арматуры № 4
- ПИЛЯРЧИК Я., ЗЕМАН В.** Сварка сегодня и завтра № 10–11
- ПОХОДНЯ И. К., ЯВДОЩИН И. Р., СКОРИНА Н. В., ФОЛЬБОРТ О. И.** Новые электроды для восстановительной наплавки железнодорожных крестовин № 3
- ПРОТОВОКОВИЛОВ И. В., ПОРОХОНЬКО В. Б., НАЗАРЧУК А. Т., ИВОЧКИН Ю. П., ВИНОГРАДОВ Д. А.** Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки № 12
- ПРОТОВОКОВИЛОВ И. В., ПОРОХОНЬКО В. Б., ПЕТРОВ Д. А.** Технологические особенности электрошлаковой сварки титана в узкий зазор № 1
- ПРОЦЕНКО П. П.** Международная квалификационная система подготовки персонала сварочного производства в Украине № 2
- РАЗМЫШЛЯЕВ А. Д., МИРОНОВА М. В., ЯРМОНОВ С. В.** Устройства ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки (Обзор) № 1
- РАЙСГЕН У., ВРИС Я. де.** Определение нестабильности процесса МАГ сварки по искажению акустических параметров дуги № 7
- РАЙСГЕН У., ШЛЕЗЕР М.** Сварные или клеевые соединения — является ли это вопросом будущего? № 10–11
- РУДЕНКО П. М., ГАВРИШ В. С.** Тиристорный преобразователь с непосредственной связью для питания контактных машин № 8
- РУСЕВ Г. М., РУСЕВ А. Г., ОВСЯННИКОВ В. В., БЫКОВСКИЙ О. Г., ПАСЬКО А. Н.** Влияние параметров режима плазменного напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц № 1
- РЯБЦЕВ И. А., БАБИНЕЦ А. А., ГОРДАНЬ Г. Н., РЯБЦЕВ И. И., КАЙДА Т. В., ЕРЕМЕЕВА Л. Т.** Структура многослойных образцов, имитирующих наплавленные инструменты для горячего деформирования металлов № 9
- СЕЛИВЕСТРОВ А. Г., ТКАЧЕНКО Ю. М., КУЛИКОВСКИЙ Р. А., БРАГИНЕЦ В. И., ЗЯХОР И. В.** Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений титанового сплава ВТЗ-1 № 1
- СЕРГЕЕВА Е. В.** Сварка трением с перемешиванием в авиакосмической промышленности (Обзор) № 5
- СОКОЛОВ М., САЛМИНЕН А.** Влияние качества поверхности кромок соединения на эффективность лазерной сварки низколегированных сталей № 2
- СОЛОВЕЙ С. А.** Повышение циклической долговечности тавровых сварных соединений с непроварами в корне шва высокочастотной механической проковкой № 1
- СТЕФАНИВ Б. В.** Особенности индукционной пайки алмазно-твердосплавных резцов с лопастью корпуса составного бурового долота № 8
- СТЕФАНИВ Б. В.** Разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов № 2
- ТИТАРЕНКО В. И., ЛАНТУХ В. Н., КАШИНСКИЙ А. С.** Установки на базе токарных станков для наплавки прокатных валков № 4
- УЯМА Т.** Тенденции в разработке оборудования для сварки в защитных газах в Японии № 10–11
- ХАСКИН В. Ю.** Развитие лазерной сварки алюминиевых сплавов в ИЭС им. Е. О. Патона (Обзор) № 5
- ХОРУНОВ В. Ф., МАКСИМОВА С. В., ВОРОНОВ В. В.** Припои системы Ti-Zr (Fe, Mn, Co) для пайки титановых сплавов № 7
- ХОРУНОВ В. Ф., САБАДАШ О. М.** Флюсовая дуговая пайка алюминия с оцинкованной сталью № 2
- ЦВЕТКОВ Ю. В., НИКОЛАЕВ А. В., САМОХИН А. В.** Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов № 10–11
- ЧЕРНЯК Я. П.** Опыт наплавки деталей и узлов строительной и дорожной техники № 3

**Ш**ЛЕПАКОВ В. Н., ГАВРИЛЮК Ю. А., КОТЕЛЬЧУК А. С., ИГНАТЮК В. Н., КОСЕНКО П. А., РОХЛИН О. Н., ТОПЧИЙ А. В. Применение механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой при ремонте металлургического оборудования № 3

ШОЛОХОВ М. А., БУЗОРИНА Д. С. Расчет параметров режима наплавки пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах № 7

**Э**НЗИНГЕР Н., СОММИТЧ К. Тенденции в развитии сварки в Австрии № 10–11

**Ю**ЩЕНКО К. А., ЯРОВИЦЫН А. В., ЯКОВЧУК Д. Б., ФОМАКИН А. А., МАЗУРАК В. Е. Некоторые пути снижения потерь присадочного порошка при микроплазменной наплавке № 9

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**Б**ОРИСОВ Ю. С., ВОЙНАРОВИЧ С. Г., КИСЛИЦА А. Н., КАЛЮЖНЫЙ С. М., КУЗЬМИЧ-ЯНЧУК Е. К. Изготовление резистивного электронагревателя способом микроплазменного напыления № 9

**В**ОРОНОВ В. В. Разработка технологии пайки титановых сплавов припоями на основе системы Al–Mg № 2

**Д**иссертации на соискание ученой степени № 1, 6, 8, 12

**З**арубежный опыт № 6, 8

**П**УЛЬКА Ч. В., СЕНЧИШИН В. С., ГАВРИЛЮК В. Я., БАЗАР М. С. Влияние технологических схем индукционной наплавки на стабильность толщины наплавленного слоя № 4

**Р**азработано в ИЭС № 2

**Ф**АЛЬЧЕНКО Ю. В., ПОЛОВЕЦКИЙ Е. В., КАПИТАНЧУК Л. М. Распределение химических элементов в зоне соединения алюминиевого сплава АМг6 с титановым ВТ6, полученного диффузионной сваркой в вакууме № 6

## ХРОНИКА

Аудит системы подготовки персонала и сертификации сварочного производства № 2

Гуше О. И. — 90 № 12

Добрушину Л. Д. — 60 № 5

Илюшенко В. М. — 75 № 8

Конкурс молодых сварщиков Львовской области № 6

К 110-летию со дня рождения А. П. Александрова № 6

К 100-летию со дня рождения Н. И. Каховского № 8

К 100-летию со дня рождения Г. Л. Петрова № 12

Конференция «Сварка — взгляд в будущее 2013» № 9

Красовскому А. Я. — 80 № 8

Международная конференция по лазерным технологиям в Украине № 7

Международная конференция «ТИТАН-2013 в СНГ» № 7

Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий» № 8

Международная научно-техническая конференция «СВАРКА И КОНТРОЛЬ-2013» № 8

Международный конкурс молодых сварщиков в Чехии № 6

Микитину Я. И. — 70 № 10–11

Научно-техническая конференция «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» № 2

Научный семинар по европейскому проекту «INNOPIPER» в Варшаве № 9

Наши поздравления (Б. А. Мовчану, Д. М. Калеко, П. А. Косенко, П. П. Проценко) № 1

Осенние сварные премьеры — 2013 № 12

Памяти А. Я. Ищенко № 7

Памяти В. И. Махненко № 1

Памяти В. И. Степахно № 7

Памяти А. И. Четврто № 7

Памяти В. В. Черных № 2

Программы профессиональной подготовки на 2014 № 12

Романюку В. С. — 60 № 8

VII Международная научно-практическая конференция «Сварочные материалы. Дуговая сварка. Материалы и качество» № 9

VII Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии» № 7

Сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук № 6

Стеклову О. И. — 80 № 8

Техническая конференция «Пайка – 2013» № 12

Фартушному В. Г. — 75 № 2

Юбилейная сессия Общего собрания Национальной академии наук Украины № 4

Юрлову Б. В. — 60 № 8

Информация № 1 № 12

Автоматические сварочные системы для заводов металлоконструкций от ООО «ДельтаСвар» № 9

Календарь выставок и конференций на 2013 г. (сварка и родственные технологии) № 1

Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы» № 9

Новая сварочная система FTM 24-120 PRO для энергетического машиностроения № 9

Обеспечение высокого качества сварных и наплавленных соединений изделий трубопроводной арматуры, энергоустановок, горно-шахтного оборудования, выполненных способами TIG HOT WIRE и CMT № 9

Правила для авторов журнала № 1

Роботизация — основа современного производства. Качество, эффективность, успех № 9

Центральная фильтровентиляционная система AIRTECH — гарантия чистого воздуха на производстве № 10–11

Указатель авторов № 12

Указатель статей за 2013 г. № 12

## УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

- Алешин Н. П. № 10-11  
 Антипин Е. В. № 9  
 Архангельский Ю. А. № 6, 9  
 Ахонин С. В. № 2, 3
- Б**  
 Бабинец А. А. № 9  
 Базар М. С. № 4  
 Белооев М. № 10-11  
 Белоус В. Ю. № 3  
 Бем Ш. № 4  
 Березин И. В. № 3  
 Бернацкий А. В. № 12  
 Бертельсбек Ш. № 4  
 Богайчук И. Л. № 8  
 Богачев Д. Г. № 12  
 Болгов Э. И. № 1  
 Бондарев А. А. № 6  
 Борисов Ю. С. № 2, 4, 7, 9, 12  
 Брагинец В. И. № 1  
 Брунс К. № 7  
 Де А. № 10-11  
 Брызгалин А. Г. № 5, 8  
 Бузорина Д. С. № 7  
 Бурба А. В. № 6  
 Бусыгин С. Л. № 4  
 Бушма А. И. № 3  
 Быковский О. Г. № 1
- В**  
 Валевиц М. Л. № 12  
 Вебер Дж. № 10-11  
 Великоиваненко Е. А. № 3, 9  
 Вибе Й. № 7  
 Виноградов Д. А. № 12  
 Вигилянская Н. В. № 2, 12  
 Виларинхо Лаура № 10-11  
 Виларинхо Лоу № 10-11  
 Войнарович С. Г. № 9  
 Волос А. В. № 7  
 Воронов В. В. № 2, 3, 7  
 Вржижевский Э. Л. № 2  
 Врис Я. де. № 7
- Г**  
 Гаврилюк В. Я. № 4  
 Гаврилюк Ю. А. № 3  
 Гавриш В. С. № 8  
 Гавриш П. А. № 12  
 Гайер М. № 4  
 Гайворонский А. А. № 5  
 Галинич В. И. № 2  
 Гарф Э. Ф. № 12  
 Гатцен М. № 3  
 Гах И. С. № 5  
 Гвоздецкий В. М. № 6  
 Гдоутос Е. № 10-11  
 Герасименко А. М. № 4  
 Германн Й. № 7  
 Голобородько Ж. Г. № 2, 6  
 Головки В. В. № 6  
 Гонтарев В. Б. № 6
- Гончаренко Л. В. № 4  
 Гончаров И. А. № 2  
 Гончаров П. В. № 8  
 Горбань В. Ф. № 7  
 Гордань Г. Н. № 9  
 Горынин И. В. № 10-11  
 Григоренко Г. М. № 3  
 Грищенко А. П. № 2, 12  
 Гуань Цяо № 10-11  
 Гурин О. А. № 1  
 Гущин К. В. № 7
- Д**  
 Демченко В. Ф. № 4, 7  
 Демченко Ю. В. № 12  
 Демьянов И. А. № 2, 12  
 Денисов И. В. № 7  
 Джексон П. № 10-11  
 Диброй Т. № 10-11  
 Дидковский А. В. № 9  
 Димлай В. № 10-11  
 Добрушин Л. Д. № 5  
 Долиненко В. В. № 1  
 Драган С. В. № 6  
 Дуб А. В. № 10-11  
 Дученко А. Н. № 2  
 Дюков В. А. № 6
- Е**  
 Евдокимов А. И. № 8  
 Еремеева Л. Т. № 9
- Ж**  
 Жарди А. № 10-11  
 Жданов С. Л. № 4  
 Жуков В. В. № 3, 9  
 Журавлев С. И. № 2
- З**  
 Загадарчук В. Ф. № 2  
 Задерий Б. А. № 5  
 Задоя В. Г. № 7  
 Зволинский И. В. № 4  
 Звягинцева А. В. № 5  
 Земан В. № 10-11  
 Зубер Т. А. № 3  
 Зяхор И. В. № 1
- И**  
 Ивочкин Ю. П. № 12  
 Игнатенко А. В. № 5  
 Игнатюк В. Н. № 3  
 Илларионов С. Ю. № 5  
 Илюшенко В. М. № 4
- К**  
 Каблов Е. Н. № 10-11  
 Кайда Т. В. № 9  
 Кайтель С. № 10-11  
 Калеко Д. М. № 8  
 Калюжный С. М. № 9  
 Капитанчук Л. М. № 6, 7, 9  
 Карасевская О. П. № 5  
 Кашинский А. С. № 4  
 Кирьян В. И. № 12  
 Кислица А. Н. № 9
- Кладко В. П. № 7  
 Клейман Я. № 10-11  
 Клименко А. А. № 7  
 Клочков И. Н. № 3  
 Кныш В. В. № 3  
 Коваленко И. В. № 12  
 Ковтун В. А. № 10-11  
 Кожукало В. И. № 4  
 Козулин С. М. № 7, 8, 12  
 Колисниченко О. В. № 12  
 Коломийцев Е. В. № 4  
 Коляда В. А. № 1  
 Копылов Л. Н. № 12  
 Коротков В. А. № 9  
 Косенко П. А. № 3  
 Косинов С. Н. № 12  
 Костин В. А. № 3, 9  
 Котельчук А. С. № 3  
 Коул Н. № 10-11  
 Кравчук Л. А. № 4, 6, 9  
 Кранц Б. № 7  
 Кривцун И. В. № 3, 7, 10-11  
 Крикент И. В. № 7  
 Кудрявцев Ю. № 10-11  
 Кузнецов В. Д. № 6  
 Кузнецов М. В. № 7  
 Кузьмич-Янчук Е. К. № 9  
 Куликовский Р. А. № 1  
 Кусков Ю. М. № 8  
 Кучук-Яценко С. И. № 2, 7, 9, 10-11  
 Кушнарера О. С. № 3  
 Кушнерев А. В. № 4
- Л**  
 Ланкин Ю. Н. № 10-11  
 Лантух В. Н. № 4  
 Лесной А. Б. № 4  
 Литвиненко С. Н. № 12  
 Лобанов Л. М. № 7-9, 12  
 Ломберг Б. С. № 10-11  
 Лычко И. И. № 7, 8, 12  
 Лясота И. Н. № 1  
 Ляховая И. В. № 8
- М**  
 Мазурак В. Е. № 9  
 Маковой В. А. № 6  
 Максименко А. А. № 4  
 Максимов С. Ю. № 8  
 Максимова С. В. № 3, 4, 7  
 Маринский Г. С. № 10-11  
 Маркашова Л. И. № 3, 12  
 Марченко А. Е. № 8  
 Махлин Н. М. № 6  
 Махненко В. И. № 3, 5, 6  
 Махненко О. В. № 1-4, 7  
 Миленин А. С. № 5, 9  
 Мирзов И. В. № 1  
 Миронова М. В. № 1  
 Миходуй О. Л. № 8, 9  
 Мищенко Д. Д. № 2

Мудж П. № 10-11  
 Мужиченко А. Ф. № 2, 3  
 Мурашов А. П. № 2, 12  
 Мюллер Т. № 7

**Н**азаренко О. К. № 1  
 Назарчук А. Т. № 12  
 Накашиба С. № 10-11  
 Нестеренков В. М. № 6, 9  
 Николаев А. В. № 10-11  
 Новосельцев Ю. Г. № 4  
 Ныркова Л. И. № 6

**О**всянников В. В. № 1  
 Окада А. № 10-11  
 Окамото Я. № 10-11  
 Олейник О. И. № 6  
 Оспенникова О. Г. № 10-11

**П**альцевич А. П. № 5  
 Пантелеймонов Е. А. № 6  
 Пасько А. Н. № 1  
 Патон Б. Е. № 7, 10-11 (2)  
 Пашин Н. А. № 8, 9  
 Пекарь Е. Д. № 5  
 Первухин Л. Б. № 7  
 Переплетчиков Е. Ф. № 4  
 Петриченко И. К. № 2  
 Петров Д. А. № 1  
 Пивторак Н. И. № 3, 9  
 Пилярчик Я. № 10-11  
 Плескачевский Ю. М. № 10-11  
 Подыма Г. С. № 8  
 Позняков В. Д. № 4, 7  
 Покляцкий А. Г. № 3  
 Половецкий Е. В. № 6  
 Попов В. Е. № 6  
 Порохонько В. Б. № 1, 12  
 Похмурская А. В. № 6  
 Похмурский В. И. № 6  
 Походня И. К. № 3, 5, 6  
 Протокилов И. В. № 1, 12  
 Проценко П. П. № 2  
 Прудкий И. И. № 2, 4  
 Пулька Ч. В. № 4  
 Пфарр М. № 10-11  
 Пышный В. М. № 6

**Р**азмышляев А. Д. № 1  
 Райсген У. № 7, 10-11

Розерт Р. № 7  
 Розынка Г. Ф. № 3, 9  
 Рохлин О. Н. № 3  
 Руденко П. М. № 8  
 Русев А. Г. № 1  
 Русев Г. М. № 1  
 Рыбаков А. А. № 4, 5, 9, 12  
 Рябцев И. А. № 4, 6, 9  
 Рябцев И. И. № 9

**С**абадаш О. М. № 2  
 Сабокарь В. К. № 2  
 Савченко И. С. № 12  
 Сакагава Т. № 10-11  
 Салминен А. № 2  
 Самотрясов С. М. № 7  
 Самохин А. В. № 10-11  
 Селивестров А. Г. № 1  
 Селин Р. В. № 3  
 Семенов Л. А. № 7  
 Семенов С. Е. № 5  
 Сенчишин В. С. № 4  
 Сергеева Е. В. № 5  
 Синеок А. Г. № 4  
 Симутенков И. В. № 6  
 Синеок А. Г. № 12  
 Синюк В. С. № 5  
 Скальский В. Р. № 1  
 Скорина Н. В. № 3, 8  
 Скуба Т. Г. № 1  
 Соколов М. № 2  
 Соловей С. А. № 1  
 Соломийчук Т. Г. № 3  
 Сомонов В. В. № 4  
 Соммитч К. № 10-11  
 Станкевич Е. М. № 1  
 Степанов Д. В. № 6  
 Стефанив Б. Ф. № 2, 8  
 Стрельчук В. В. № 7  
 Студент М. М. № 6  
 Ступницкий Т. Р. № 6  
 Суа С. № 10-11  
 Судавцова В. С. № 2  
 Сударкин А. Я. № 2  
 Супрун С. А. № 7

**Т**ат Хин Ган № 10-11  
 Тимошенко А. Н. № 8  
 Титаренко В. И. № 4

Ткаченко Ю. М. № 1  
 Топчий А. В. № 3  
 Тюрин Ю. Н. № 12

**У**яма Т. № 10-11

**Ф**альченко Ю. В. № 6  
 Федоренко Н. С. № 6  
 Филипчук Т. Н. № 4, 5, 9, 12  
 Фоллертсен Ф. № 3  
 Фольборт О. И. № 3  
 Фольпп Й. № 3  
 Фомакин А. А. № 9

**Х**аскин В. Ю. № 3-5  
 Хернандез Д. № 10-11  
 Хоменко В. И. № 2, 10-11  
 Хорунов В. Ф. № 2-4, 7  
 Худецкий И. Ю. № 10-11

**Ц**ветков Ю. В. № 10-11

**Ч**ертко П. Н. № 7  
 Чернец А. В. № 10-11  
 Чернобай С. В. № 8  
 Черняк Я. П. № 1, 3, 6, 8  
 Чигарев В. В. № 12

**Ш**аповалов Е. В. № 1  
 Шаповалов К. П. № 12  
 Швец В. И. № 2, 9  
 Швец Ю. В. № 2  
 Шевчук Р. Н. № 2  
 Шекера В. М. № 6  
 Шепотько В. П. № 12  
 Шлезер М. № 10-11  
 Шлепаков В. Н. № 3  
 Шолохов М. А. № 7  
 Шуба И. В. № 4

**Э**нзингер Н. № 10-11

**Ю**щенко К. А. № 5, 7, 9, 12

**Я**вдошин И. Р. № 3  
 Яковчук Д. Б. № 9  
 Ярмонов С. В. № 1  
 Яровицын А. В. № 9

## ПОДПИСКА — 2014 на журнал «Автоматическая сварка»

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

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайтах:  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com); <http://www.rucont.ru>.

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

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2012 гг. и текущие выпуски 2013 г.

## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

**Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров**

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

**Технические требования к рекламным материалам**

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

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

**Стоимость рекламы и оплата**

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

**Контакты:**

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84  
 E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

© Автоматическая сварка, 2013

Подписано к печати 11.11.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,90. Уч.-изд. л. 10,36 + 5 цв. вклеек.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

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

## ОЗСО ИЭС им. Е. О. ПАТОНА — ОАО «ТУРБОАТОМУ»

Опытный завод сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины изготовил для ОАО «Турбоатома» четыре комплекта уникального оборудования для автоматической дуговой сварки под флюсом. Техническая документация разработана ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона. Оборудование обеспечивает автоматическую дуговую сварку под флюсом кольцевых швов в глубокую разделку роторов мощных турбин. Это оборудование должно заменить старое, физически и морально изношенное, имеющееся на «Турбоатоме». В состав комплекта входят:



Во время посещения Б. Е. Патонем и И. В. Кривцуном испытательного участка опытного завода

— аппарат для сварки в узкую разделку;

— источник питания постоянного тока;

— система управления для двух порталных установок, включающая шкафы управления аппаратами; шкафы управления приводами; пульт управления; кабели управления.

Предусмотрена работа сварочного оборудования в трех режимах:

— НАЛАДКА — для проверки работы каждого аппарата;

— ПОЛУАВТОМАТ — для сварки одиночными швами с ручной раскладкой валиков в разделке;

— АВТОМАТ — для сварки с автоматической раскладкой валиков (1, 2 и 3 валика) и подъем аппарата на величину слоя наплавленного металла.

Система управления обеспечивает:

— ввод оператором основных режимов сварки (напряжение дуги, скорость подачи электрода, скорость сварки), стабилизацию и контроль отклонения параметров с выдачей светового и звукового сигналов;

— ввод оператором начального (при выполнении корневого прохода) диаметра изделия и шага подъема для автоматического поддержания заданий линейной скорости сварки при изменении диаметра изделия (в процессе заполнения «разделки») и управления приводом вращения изделия;

— возможность сбора данных параметров сварки с использованием компьютера для системы регистрации параметров.

### Основные технические характеристики сварочных автоматов и источников питания:

Напряжение и частота питающей сети, В, Гц	3×380,50
Ток сварки, А	150...500
Напряжение на дуге, В	25...45
Наружный диаметр свариваемого изделия, мм	150...3450
Глубина разделки, мм	до 400
Ширина разделки, мм	24...36
Диаметр электродной проволоки, мм	1,2...3,2
Скорость подачи проволоки, м/ч	30...350
Линейная скорость сварки, м/ч	10...30

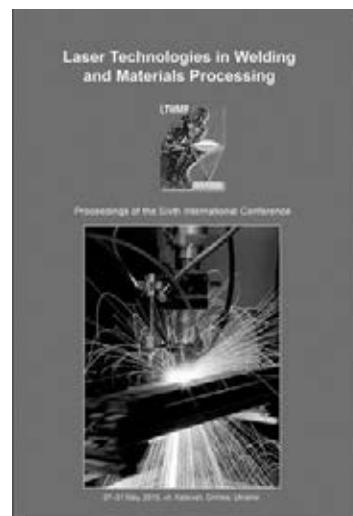
Климатическое исполнение шкафов и пультов управления произведено согласно УХЛ4 по ГОСТ 15150–69. Степень защиты не ниже IP55.

Проверка работоспособности оборудования в присутствии представителя «Турбоатома» проведена на испытательном участке Опытного завода. Предоставленное оборудование, в любой комплектации, может быть использовано при сварке под флюсом в узкую разделку изделий другой конфигурации.

## НОВЫЕ КНИГИ

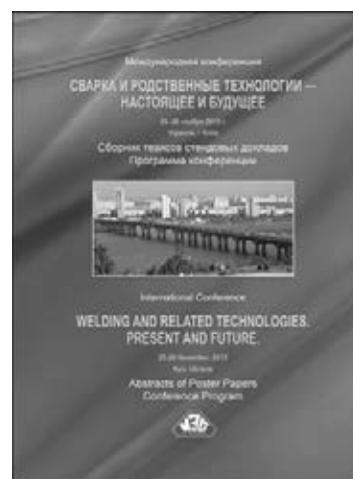
ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 102 с.

Сборник содержит 22 доклада, представленных на Шестой международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (27–31 мая 2013 г., ДТУ «Кацивели», Большая Ялта, Крым, Украина), в которых отражены последние достижения в лазерной сварке, резке, наплавке и других передовых процессах лазерной обработки материалов. Рассматриваются перспективы применения лазерных технологий. Авторами статей являются ученые и специалисты из различных стран мира.



СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ: Тез. станд. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2013. — 222 с.

В сборнике представлено 200 тезисов стендовых докладов международной конференции «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее» (25–26 ноября 2013 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины), в которых отражены научные достижения в области сварки и родственных технологий за последние годы (пленарные доклады конференции опубликованы в журнале «Автоматическая сварка», №10–11, 2013).



СВАРКА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖИВЫХ ТКАНЕЙ. ТЕОРИЯ. ПРАКТИКА. ПЕРСПЕКТИВЫ: Материалы Восьмой междунар. науч.-практ. конф. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2013. — 70 с.

В сборнике представлены тезисы 23 пленарных и 26 стендовых докладов Восьмой международной научно-практической конференции «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы» (29–30 ноября 2013 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины), в которых отражены научные достижения и практические результаты в области ВЧ-электросварки и термической обработки живых мягких тканей за последние годы. Предназначен для медицинских работников, врачей хирургического профиля, организаторов здравоохранения, специалистов в области медицинской техники, а также студентов старших курсов высших медицинских учебных заведений.



Сборники в электронном виде представлены на сайте [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com).  
Печатные версии сборников можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка»:  
тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)

## Мировая премьера на выставке «Сварка и резка – 2013» — AccuPocket\*

Выставка «Сварка и резка» проходит каждые четыре года в г. Эссен (Германия) и является крупнейшим и наиболее знаковым событием в мире сварочных технологий. С 16 по 21 сентября 2013 года, во время последней выставки, на стенде компании «Fronius» состоялись сразу две громкие мировые премьеры. Одной из них является модульная сварочная система нового поколения TPS/i, другая — AccuPocket, сварочный аппарат с высокоэффективной аккумуляторной батареей.

AccuPocket — это первый в мире сварочный аппарат, работающий от аккумуляторной батареи и обладающий малым весом (11 кг). Он предоставляет пользователю беспрецедентную мобильность при ручной дуговой сварке покрытым электродом (ММА) и при сварке TIG. Кроме этого, если речь идет о качестве сварных соединений, AccuPocket значительно превосходит множество аналогичных аппаратов с питанием от сети.

Кроме незначительного веса, новинка от компании «Fronius» имеет небольшие габаритные размеры, прочный и эргономичный корпус, а также встроенный пылевой фильтр.

Инновационная технология AccuBoost гарантирует оптимальный поджиг, максимальную стабильность процесса и высокие динамические характеристики дуги. Встроенный аккумулятор обеспечивает необходимые значения тока короткого замыкания во время сварки, исключая при этом прилипание электрода. Идеальное взаимодействие между батареей и электроникой также способствует работе с высоким напряжением сварки и высокой мощностью. Это надежно предотвращает непрогнозируемые обрывы дуги.

Аппарат AccuPocket предназначен для работы со всеми типами электродов (рутиловые, основные, целлюлозные и электроды специального назначения) диаметром до 3,25 мм. Среди доступных для сваривания материалов: низко- и высоколегированные стали, а также цветные металлы. Такая универсальность делает AccuPocket оптимальным решением для широкого круга задач по сварке. Одного заряда аккумуляторной батареи хватает для выполнения качест-



AccuPocket — первый в мире сварочный аппарат, работающий от аккумуляторной батареи



Г-н Отто Шустер, член руководства компании Fronius International GmbH, вручает сертификат на сварочный аппарат AccuPocket победителю конкурса Юрию Сороке, CFD «Триада Сварка»

\* Статья на правах рекламы.

венной сварки с использованием шести электродов диаметром 3,25 мм, или же восемнадцати электродов диаметром 2,5 мм. Среди основных характеристик нового сварочного аппарата в первую очередь стоит выделить функции HotStart и SoftStart, а также постоянно регулируемую динамику дуги (Arc-force).

Функция HotStart означает отличный поджиг дуги при использовании как рутитовых, так и основных, и целлюлозных электродов. Благодаря SoftStart обеспечивается высокая стабильность дуги в случае применения основных электродов, при поджиге на низких токах. На протяжении всего сварочного процесса динамика дуги постоянно регулируется для предотвращения короткого замыкания за счет моментального увеличения тока.

Дополнительно к вышеупомянутым возможностям, AccuPocket может похвастаться набором функций для качественного и максимально удобного процесса сварки TIG.

Режим сварки TIG импульсной дугой способствует улучшенному контролю сварочной ванны в разных пространственных положениях сварки и гарантирует надежное заполнение зазоров.

Функция TAC обеспечивает быстрое и легкое выполнение прихваток импульсной дугой. В рамках использования функции TIG Comfort Stop заданное движение сварочной горелки обеспечивает автоматическое уменьшение сварочного тока. Это предотвращает непрогнозируемый обрыв дуги в конце сварки.

В первый день выставки «Сварка и резка» на стенде «Fronius» было проведено торжественное мероприятие для представителей, дистрибьюторов и клиентов компании. В рамках праздничного вечера состоялся конкурс и розыгрыш ценных призов.

Приятно отметить, что главный приз, сварочный аппарат AccuPocket, выиграл сотрудник Запорожского предприятия «Триада Сварка», сертифицированного дистрибьютора Fronius (CFD). Компания ООО «Фрониус Украина» искренне поздравляет Юрия Сороку, счастливого обладателя первого в Украине аппарата для сварки MMA и TIG с высокоэффективной аккумуляторной батареей.

*Fronius International — австрийское предприятие, головной офис которого расположен в Петтенбахе и которое также имеет отделения в Вельсе, Тальхайме и Заттледте. Предприятие специализируется на системах для заряда батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3239 сотрудников. Доля экспорта составляет 94 %, что достигается благодаря 19 дочерним компаниям, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 864 действующим патентам «Fronius» является лидером в области технологий на мировом рынке.*



ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»

07455, Киевская обл.,

Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24

Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua