

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Главный редактор  
Б. Е. Патон

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

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

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

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

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

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001  
ISSN 0005-111X  
Doi.org/10.15407/as

Рекомендовано к печати Ученым советом  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

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

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная  
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

**СОДЕРЖАНИЕ**

Интервью с заведующим отдела ИЭС им. Е. О. Патона  
членом-корреспондентом НАН Украины  
В. Д. Позняковым ..... 3

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

*Тараборкин Л. А., Головки В. В.* Расчетная модель  
формирования неметаллических включений многослой-  
ной морфологии в металле сварного шва ..... 5  
*Маркашова Л. И., Позняков В. Д., Шелягин В. Д.,  
Бердникова Е. Н., Бернацкий А. В., Алексеенко Т. А.*  
Влияние структуры металла сварных соединений  
высокопрочных сталей, выполненных различными  
способами сварки, на их эксплуатационные свойства ..... 11  
*Кныш В. В., Соловей С. А., Ныркова Л. И., Мирянин В. Н.*  
Влияние коррозионных повреждений на циклическую  
долговечность стыковых сварных соединений, упрочнен-  
ных высокочастотной механической проковкой ..... 19  
*Стефанив Б. В., Сабадаш О. М.* Влияние структуры зоны  
соединения алмазного слоя с твердосплавной подлож-  
кой паяных резцов на их эксплуатационный ресурс ..... 25

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

*Кузьменко Г. В., Тагановский В. М., Сидоренко В. Л.*  
Электродуговая сварка и наплавка при ремонте рельсов  
киевского метрополитена ..... 30  
*Позняков В. Д., Демченко Ю. В., Денисенко А. М.,  
Жук Г. В., Козырев В. Б.* Применение сварки для рес-  
таврации чугунного перильного ограждения моста  
Коцебу в Одессе ..... 34  
*Борисов Ю. С., Войнарович С. Г., Кислица А. Н., Калюж-  
ный С. Н., Глуховский В. Ю.* Применение метода мик-  
роплазменного напыления для изготовления резист-  
тивного нагревательного элемента ..... 42  
*Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В.*  
Электрошлаковая наплавка торцов заготовок с исполь-  
зованием расходуемого и нерасходуемого электродов .... 48

**ХРОНИКА**

Наши поздравления ..... 53  
Подготовка специалистов для КНР ..... 53  
Международный конкурс студенческих работ ..... 54  
В Международном институте сварки ..... 55

**ИНФОРМАЦИЯ**

Порошковая проволока для мокрой подводной сварки ..... 57  
Компания Fronius — новатор внедрения цифровых  
и коммуникационных технологий ..... 59  
Календарь февраля ..... 62

# Автоматичне Зварювання

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

Головний редактор **Б. Є. Патон**

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

## ЗМІСТ

## CONTENTS

Інтерв'ю з завідуючим відділу ІЕЗ ім. Є. О. Патона членом-кореспондентом НАН України  
В. Д. Позняковим ..... 3

Interview with V.D.Poznyakov, corr.-member of the NAS of Ukraine, Chief of Department of the E. O. Paton Electric Welding Institute ..... 3

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Тараборкин Л. А., Головка В. В.* Розрахункова модель формування неметалевих включень багатшарової морфології в металі зварного шва ..... 5  
*Маркашова Л. І., Позняков В. Д., Шелягін В. Д., Берднікова О. М., Бернацький А. В., Алексеєнко Т. О.* Вплив структури металу зварних з'єднань високоміцних сталей, виконаних різними способами зварювання, на їх експлуатаційні властивості ..... 11  
*Кныш В. В., Соловей С. О., Ниркова Л. І., Мірянін В. М.* Вплив корозійних пошкоджень на циклічну довговічність стикових зварних з'єднань, зміцнених високочастотним механічним проковуванням ..... 19  
*Стефанів Б. В., Сабадаш О. М.* Вплив структури зони з'єднання алмазного шару з твердосплавною підкладкою паяних різців на експлуатаційний ресурс ..... 25

*Taraborkin L. A., Golovko V. V.* Calculation model of formation of nonmetallic inclusions of multilayer morphology in weld metal ..... 5  
*Markashova L. I., Poznyakov V. D., Shelyagin V. D., Berdnikova E. N., Bernatskii A. V., Alekseenko T. A.* Effect of metal structure of high-strength steel welded joints produced using different methods of welding on their service properties ..... 11  
*Knysh V. V., Solovey S. A., Nyrkova L. I., Miryanin V. N.* Influence of corrosion damages on cyclic life of butt welded joints strengthened by high-frequency mechanical peening ..... 19  
*Stefiniv B. V., Sabadash O. M.* Effect of structure of joint zone of diamond layer with hard-alloy substrate of brazed cutters on their service life ..... 25

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

### INDUSTRIAL

*Кузьменко Г. В., Тагановський В. М., Сидоренко В. Л.* Електродугове зварювання і наплавка під час ремонту рейок київського метрополітену ..... 30  
*Позняков В. Д., Демченко Ю. В., Денисенко А. М., Жук Г. В., Козирев В. Б.* Застосування зварювання для реставрації чавунного поручневого огороження мосту Коцебу в Одесі ..... 34  
*Борисов Ю. С., Войнарович С. Г., Кислиця О. М., Калюжний С. М., Глуховський В. Ю.* Застосування методу мікроплазмового наплення для виготовлення резистивного нагрівального елемента ..... 42  
*Кусков Ю. М., Соловйов В. Г., Осечков П. П., Осін В. В.* Електрошлакове наплення торців заготовок з використанням витратного та невитратного електродів ..... 48

*Kuzmenko G. V., Taganovskii V. M., Sidorenko V. L.* Electric arc welding and surfacing in repair of rails of Kiev metro ..... 30  
*Poznyakov V. D., Demchenko Yu. V., Denisenko A. M., Zhuk G. V., Kozyrev V. B.* Application of welding for restoration of cast iron railing of the Kotzebue bridge in Odessa ..... 34  
*BorISOV Yu. S., Voinarovich S. G., Kislitsa A. N., Kalyuzhnyi S. N., Glukhovskii V. Yu.* Application of the method of microplasma spraying for manufacturing resistance heating element ..... 42  
*Kuskov Yu. M., Solovjov V. G., Osechkov P. P., Osin V. V.* Electroslag surfacing of billet end faces with application of consumable and nonconsumable electrodes ..... 48

### ХРОНІКА

### NEWS

Наші вітання ..... 53  
Підготовка фахівців для КНР ..... 53  
Міжнародний конкурс студентських робіт ..... 54  
У Міжнародному інституті зварювання ..... 55

Congratulations ..... 53  
Training of specialists for P.R. China ..... 53  
International competition of students' works ..... 54  
At the International Institute of Welding ..... 55

### ІНФОРМАЦІЯ

### INFORMATIONS

Порошковий дріт для мокрого підводного зварювання ..... 57  
Компанія Fronius — новатор впровадження цифрових і комунікаційних технологій ..... 59  
Календар лютого ..... 62

Underwater wet welding with flux-cored wire ..... 57  
«Fronius» Company is the innovator of implementation of numerical and communication technologies ..... 59  
Calendar of February ..... 62

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

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

#### Адреса редакції

#### Address

03150, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
Тел./Факс: (044) 200-82-77, 200-63-02  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

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

## **Интервью с заведующим отдела ИЭС им. Е. О. Патона членом-корреспондентом НАН Украины В. Д. Позняковым**

*Научная деятельность отдела «Сварка легированных сталей» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, руководимого лауреатом Государственной премии Украины в области науки и техники Валерием Дмитриевичем Позняковым, связана с проблемами сварки высокопрочных сталей.*

*В канун 60-летия со дня рождения В. Д. Познякова редакция журнала взяла у юбиляра интервью, связанное с направлением его деятельности.*



**Валерий Дмитриевич, Ваша многолетняя научная деятельность в ИЭС связана с созданием и совершенствованием технологий изготовления и ремонта металлических конструкций из высокопрочных сталей. Чем объяснить постоянный интерес к этой тематике?**

Ответ на данный вопрос я бы разделил на две части: первая касается вопросов сварки и изготовления металлоконструкций из высокопрочных сталей, вторая — создания ремонтно-сварочных технологий для восстановления целостности и эксплуатационных свойств оборудования, машин, механизмов и инженерных сооружений.

Интерес к сварке высокопрочных сталей связан с тем, что их применение при изготовлении металлоконструкций позволяет существенно снизить вес изделий, повысить их надежность и долговечность.

Эти стали постоянно совершенствуются — изменяется их легирование, вводятся микролегирующие добавки, используются новые технологии прокатки и термической обработки. Однако в большинстве случаев такие стали требуют и более тщательного подхода к технологиям сварки, в связи с чем и возникает необходимость в их совершенствовании.

Несмотря на надежность изделий, в процессе длительной эксплуатации под воздействием внешних нагрузок в сварных конструкциях возникают усталостные повреждения, вследствие чего образуются трещины. Как правило, такие трещины возникают в локальных, особо нагруженных участках металлоконструкций, чаще всего в сварных соединениях. Учитывая то, что разрушения носят локальный характер, их экономически часто выгоднее ремонтировать, а не заменять новыми. Для ремонта металлоконструкций создаются специальные сварочные технологии. Такие технологии были востребованы всегда, но особенно актуальны для нашего государства сегодня.

**Какие сегодня перспективы применения высокопрочных сталей при создании новых экономических сварных конструкций?**

Поскольку высокопрочные стали удачно сочетают высокую прочность, хладостойкость, пластичность, вязкость и отличаются хорошей свариваемостью, они находят и будут в дальнейшем находить широкое применение при изготовлении особо нагруженных металлоконструкций машин и механизмов горной и строительной техники, в мостостроении, при строительстве высотных каркасных зданий, а также в других отраслях промышленности, которые, я уверен, будут в Украине развиваться.

**На протяжении не одного десятка лет ученые спорили о главенстве водородной или закалочной гипотез, объясняющих образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных закаливающихся сталей. Вам же удалось установить еще и критерий влияния напряженного состояния соединений на процесс их зарождения. Расскажите, пожалуйста, об этом подробнее.**

Отвечая на этот вопрос, я бы не выделял главенствующую роль какого-либо одного их перечисленных Вами факторов на образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей. Нам удалось установить количественную связь между напряженным состоянием сварных соединений и их стойкостью к образованию холодных трещин в зависимости от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и химического состава высокопрочных сталей разного класса прочности. В конечном итоге был разработан критерий, позволяющий сравнить стойкость к образованию холодных трещин соединений сталей с пределом текучести от 350 до 800 МПа между собой.

**Валерий Дмитриевич, в коллектив возглавляемого Вами отдела «влилась» лаборатория «Сварка в строительстве». Как бы Вы охарактеризовали в связи с этим вновь возникающие задачи?**

Есть надежда, что это слияние позволит нам в будущем предложить для мостостроения номенклатуру сталей более высокого класса прочности по сравнению с теми, которые в настоящее время используются в Украине.

**В силу определенных обстоятельств вектор научно-производственной деятельности руководимого Вами отдела снова повернулся в сторону создания машин специального назначения, а именно, сварных металлоконструкций бронетехники. Какие новые подходы, на Ваш взгляд, необходимо реализовать в этом плане?**

Следует отметить, что в настоящее время при изготовлении металлоконструкций бронированной техники применяются стали нового поколения с более высокими прочностными показателями, твердостью и вязкостью. Общим для таких сталей является то, что они трудно свариваются. В связи с этим возникает потребность в разработке новых технологий, которые бы позволили повысить технологическую и эксплуатационную прочность сварных корпусов легкобронированных машин.

На мой взгляд, данная проблема может быть решена, в частности, за счет применения для сварки броневых сталей импульсно-дуговых процессов, а также сварки пульсирующей дугой и гибридных процессов сварки. Изучением этих процессов сварки применительно к броневым сталям в настоящее время активно занимаются сотрудники руководимого мною отдела.

**Какие практические примеры воплощения в жизнь ремонтных сварочных технологий?**

Таких примеров много. В частности, разработанные на базе выполненных в отделе исследований технологии ремонта, были успешно внедрены при восстановлении целостности и геометрических размеров ряда уникальных металлоконструкций. Среди них навесное оборудование карьерных экскаваторов, базовые узлы (станины, кольца опорные, конусы) дробилок для измельчения горной породы и прессового оборудования. Развитие работ в этом направлении позволило создать ремонтно-сварочные технологии, которые были использованы при ремонте ряда строительных сооружений, среди которых металлоконструкции угольных галерей, пролетных строений мостовых переходов (железнодорожный мост через р. Ворскла, г. Полтава, Украина), корпуса регенератора Р-202 каталитического крекинга и многих других объектов. Опыт проведения таких работ подробно описан на страницах журнала «Автоматическая сварка».

**Какие основные факторы Вы могли бы назвать, которые сегодня сдерживают развитие прикладной науки?**

Основными факторами, сдерживающими развитие прикладной науки, на мой взгляд, является недостаточное финансирование науки со стороны государства. Следствием этого является отсутствие возможности привлечь в науку талантливую молодежь. С этим также связан тот факт, что свои работы мы вынуждены выполнять на устаревшем оборудовании, а это, как известно, не способствует получению новых знаний.

**Какие, на Ваш взгляд, направления развития сварочных технологий могут быть перспективными на ближайшие годы?**

Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка, гибридные процессы сварки, ранее упомянутые импульсно-дуговые процессы сварки, а также хорошо известные процессы сварки давлением, активно развивающиеся в институте в настоящее время.

**Какие профессиональные советы Вы можете дать тем, кто только делает первые шаги в науке?**

Первое — не лениться изучать техническую литературу по интересующему вопросу, второе — не стесняться задавать вопросы, третье — учиться самостоятельно выполнять работу, четвертое — учиться анализировать результаты, полученные в процессе исследований, и самое главное — любить дело, которым занимаешься.

**Когда к Вам пришло осознание того, что Вы не ошиблись с выбором профессии?**

Когда я овладел ее азами и понял, что моя профессия приносит пользу государству.

**Благодарим Вас, Валерий Дмитриевич, за интересное освещение проблем сварки и ремонта металлоконструкций из высокопрочных сталей и желаем Вам крепкого здоровья и новых достижений на благо Украины.**

# РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ МНОГОСЛОЙНОЙ МОРФОЛОГИИ В МЕТАЛЛЕ СВАРНОГО ШВА

Л. А. ТАРАБОРКИН, В. В. ГОЛОВКО

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

Целью работы было создание расчетной модели для практического прогнозирования кинетики формирования многокомпонентных эндогенных неметаллических включений в металле сварного шва. Предложенная математическая модель представляет собой нестандартную нелинейную краевую задачу для системы диффузионных уравнений со специфическим условием на движущейся межфазной границе расплав–включение и учитывает кинетику и гетерогенность процесса в условиях реального термического цикла сварки. Созданная как компьютерная реализация разработанной модели расчетная программа позволяет оценивать в вычислительном эксперименте размер и состав оксидных эндогенных неметаллических включений в зависимости от концентрационного и теплового режимов в сварочной ванне. Библиогр. 10, рис. 2.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварочная ванна, неметаллические включения, математическая модель, прогнозирование

Неметаллические включения являются естественной составляющей структуры любой стали, выполняя существенную роль в различных процессах и явлениях как при ее производстве, так и в течение последующей эксплуатации [1–3].

Имеющиеся в научной литературе математические модели для прогнозирования состава, размера и количества неметаллических включений характеризуются тем, что, пытаясь упростить их математическую и компьютерную реализацию, авторы вынуждены делать определенные предположения, не в полной мере соответствующие особенностям физико-химических и теплофизических процессов при сварке [4, 5]. В частности, речь идет о необходимости учета высоких градиентов температур и концентраций, которые сопровождают образование сварного шва, а также существенной нестационарности и гетерогенности соответствующих процессов. Указанные особенности можно учесть, используя для формулировки математической модели уравнения типа реакционной диффузии с добавлением специфического условия на подвижной поверхности образованного неметаллического включения, что и сделано в данной работе.

**Физико-химическое описание процесса.** В основу математической модели положено следующее физико-химическое описание процесса формирования неметаллических включений в металле сварного шва:

1) диапазон рассматриваемых температур при охлаждении металла сварочной ванны — от 2300 до 1670 К в соответствии с реальным термиче-

ским циклом сварки (верхняя граница температурного диапазона соответствует наименьшей температуре образования оксида алюминия  $Al_2O_3$ , который является наиболее тугоплавким соединением по сравнению с другими составляющими неметаллических включений в заданной системе);

2) в начальный момент времени элементы-раскислители (Al, Ti, Si, Mn и т. д.) гомогенно растворены в расплаве;

3) зародыши неметаллических включений имеют форму сферы (начальный радиус которой равен критическому радиусу, исчисляемому через свободную энергию образования) и равномерно распределены в объеме расплава;

4) формирование включений начинается в жидком металле сварочной ванны и продолжается в двухфазной зоне, причем рост включений происходит в диффузионной ячейке определенного размера по механизму реакционной диффузии, а именно: реагенты (кислород и элементы-раскислители) диффузионным переносом доставляются к поверхности включения, на которой происходит соответствующая химическая реакция взаимодействия между ними, и продукты реакции адсорбируются на указанной поверхности;

5) вероятность образования включений определенного состава зависит от температур их плавления и энергии образования, так что, в отличие от известных моделей, в определенных температурных поддиапазонах рассматриваются различные наборы химических реакций, соответственно меняется и состав металлической матрицы расплава;

6) диффузионные области растущих включений не перекрываются;

7) в каждый момент времени в течение всего процесса на межфазной поверхности раздела «включение–расплав» имеет место термодинамически равновесное состояние;

8) температурный режим процесса задан как функциональная зависимость температуры от переменной времени.

**Формулировка математической модели.** Чтобы сформулировать по данному физико-химическому описанию соответствующую математическую модель, введем следующие обозначения:

$N$  — общее количество элементов-реагентов (кислород, раскислители и др.) в системе;

$i$  — номер рассматриваемого химического элемента;

$C_i$  — содержание (концентрация)  $i$ -го элемента в расплаве, моль/см<sup>3</sup>;

$M_i$  — молекулярная масса  $i$ -го элемента;

$D_i$  — коэффициент диффузии  $i$ -го элемента в расплаве, моль/(см<sup>2</sup>·с);

$t$  — переменная времени, с;

$r$  — геометрическая переменная в сферической системе координат;

$a(t)$  — текущий радиус включения в момент времени  $t$ , см;

$T$  — температура как функция времени,  $T = T(t)$ , К;

$r_m$  — размер диффузионной ячейки, связанный с объемной долей  $V_f$  и средним объемом включений  $V_m$  соотношением, см

$$r_m = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{V_m}{V_f}}$$

Объемный массоперенос (за пределами включения) описываем с помощью уравнения диффузии Фика, которое в сферической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_i(T) r^2 \frac{\partial C_i(r,t)}{\partial r} \right), \quad a(t) < r < r_m; \quad (1)$$

на межфазной поверхности концентрация реагента рассчитывается как равновесная величина  $C_{i, \text{равн}} = f(C_j|_{r=a(t)}, T(t))$  согласно предположению 4);

$$C_i(r,t) \Big|_{r=a(t)} = C_{i, \text{равн}}; \quad (2)$$

на границе диффузионной ячейки поток вещества отсутствует, что соответствует равенству

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_m} = 0; \quad (3)$$

радиус включения во время его роста увеличивается за счет совместного выделения на поверхности включения продуктов соответствующей химической реакции

$$\frac{1}{3} \frac{d}{dt} (\rho a^3(t)) = a^2(t) k(C_{j, \text{равн}}, T) \times \sum_{i=1}^N X_i(T) M_i D_i(T) \frac{\partial C_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=a(t)}, \quad (4)$$

где  $X_i(T)$  представляет собой характеристическую функцию, которая фактически определяет набор оксидов, которые могут входить в неметаллические включения на каждом температурном интервале:

$$X_i(T) = \begin{cases} 0, & T > T_i, \\ 1, & T \leq T_i, \end{cases}$$

где через  $T_i$  обозначена температура плавления  $i$ -го оксида. Итак, считая, что  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > \dots$ , получаем, что при температуре ниже  $T_2$  неметаллическое включение содержит только первый оксид; при дальнейшем понижении температуры до  $T_3$  неметаллическое включение будет образовываться за счет как первого, так и второго оксидов; на следующем температурном интервале оно образуется уже за счет трех оксидов, и так далее (заметим, что такая картина соответствует описанной в монографии [1]); коэффициент  $k(C_{j, \text{равн}}, T)$  зависит от текущего концентрационного состояния у поверхности включения и может быть определен в каждый момент времени при условии равновесного перераспределения подведенного к поверхности включения вещества между металлической и шлаковой фазами.

Начальное условие заключается в том, что поля концентраций реагентов пространственно однородные (в области между поверхностью включения и границей диффузионной ячейки):

$$C_i(r,t) \Big|_{t=0} = C_{i,0}, \quad a(0) < r < r_m, \quad (5)$$

причем начальные условия рассчитываются по отдельному алгоритму, который учитывает реальные условия сварки;

начальный радиус включения, согласно предположению 3), равен критическому радиусу зародыша:

$$a(0) = r_{\text{crit}}(C_{i,0}, T(0)). \quad (6)$$

Таким образом, математическая модель образования неметаллических включений сформулирована в виде нелинейной краевой задачи (1)–(6) для системы уравнений типа диффузии в области с подвижной границей, причем по смыслу она является задачей реакционной диффузии.

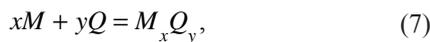
Отличительной особенностью этой модели является учет нестационарности процесса в условиях многокомпонентности системы, в которой формируются включения. Кроме того, благодаря нестандартному условию (4) на подвижной

поверхности растущего включения удается избежать от необходимости технически сложного определения констант скоростей указанных реакций, величины которых к тому же сильно зависят от температуры.

С другой стороны, граничное условие (4) на межфазной разделительной поверхности приводит к необходимости расчета равновесного состава многокомпонентной системы, которую можно представлять как составленную из двух растворов — металлического и шлакового.

Важным этапом численного моделирования процесса образования эндогенных неметаллических включений является расчет начального содержания легирующих элементов в сварочной ванне. Алгоритм этого расчета подробно изложен в работе [6]. Указанный алгоритм базируется на модели перехода легирующих элементов в сварочную ванну и шов для дуговой сварки под флюсом и позволяет численно оценить массовые доли легирующих элементов в сварочной ванне и металле сварного шва на основе сведений о химическом составе использованных сварочных материалов.

**Алгоритм расчета концентраций на межфазной подвижной поверхности.** Применяя подход, изложенный в работе [7], будем считать, что на межфазной поверхности между неметаллическим включением и жидкой сталью происходит реакция по уравнению



где  $M$  — металлический (легирующий) элемент (Al, Mn, Ti, Si и др.),  $Q$  — неметаллический элемент (O, N, S и др.).

Для такой реакции константу равновесия задают уравнением

$$k_{eq} = \frac{a_{M_xQ_y}}{a_M^x a_Q^y} = \frac{1}{[f_M c_M^i]^x [f_Q c_Q^i]^y} = \exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right), \quad (8)$$

где  $a_{M_xQ_y}$ ,  $a_M$ ,  $a_Q$  — активности веществ  $M_xQ_y$ ,  $M$ ,  $Q$ ;  $c_M^i$ ,  $c_Q^i$  — концентрации на межфазной границе  $M$  и  $Q$ , соответственно, мас. %;  $f_M$ ,  $f_Q$  — коэффициенты активности  $M$  и  $Q$ , соответственно;  $\Delta G^0$  — стандартная свободная энергия обмена для реакции (7).

Рассматривая отношение потоков  $M$  и  $Q$  на межфазной поверхности растущего включения, можно вывести уравнение

$$c_M^i = c_M^b - \frac{xm}{ym_Q} \sqrt{\frac{D_M}{D_Q}} (c_Q^b - c_Q^i) \quad (9)$$

где  $c_M^b$ ,  $c_Q^b$  — концентрации  $M$  и  $Q$  (мас. %) в глубине металла;  $m_M$ ,  $m_Q$  — атомные массы  $M$  и  $Q$ ;  $D_M$ ,  $D_Q$  — атомные массы  $M$  и  $Q$  в жидкой стали.

Тогда межфазные концентрации  $M$  и  $Q$ , т. е.  $c_M^i$ ,  $c_Q^i$  — соответственно можно найти, решив систему уравнений (8), (9).

Учитывая специальную структуру уравнений этой системы, для искомой величины концентрации кислорода  $c_Q^i$  на межфазной поверхности получили уравнение

$$c_Q^i = (c_Q^b)^{-y/x} \frac{1}{P \sqrt[k_{eq}]{f_M f_Q^{y/x}}} - \frac{c_M^b}{P} + c_Q^b, \quad (10)$$

где для краткости обозначено

$$P = (x/y) \left( m_M / m_Q \right) \sqrt{D_Q / D_M}.$$

Уравнение (10) решаем приближенно методом поразрядного деления с количеством разрядов 10, обеспечивающим число знаков после запятой, соответствующее порядку заданной точности решения.

Найдя  $c_Q^i$  для  $i$ -го элемента, по уравнению (9) численно определяем величину концентрации легирующего элемента на межфазной поверхности.

**Алгоритм оценки средней плотности неметаллического включения.** В условии (4) на подвижной межфазной границе фигурирует текущее значение плотности неметаллического включения, зависящее от времени процесса. Как оценку указанной плотности использовали среднюю плотность неметаллического включения, определяемую из тех соображений, что соотношение между количеством оксидов в неметаллическом включении в каждый момент времени численно такое же, как и в равновесном состоянии оксидной фазы для данной температуры. Количественный состав оксидной фазы целесообразно рассчитывать по теории шлака как системы с коллективной электронной фазой, которая в практически важных случаях обеспечена необходимым набором численных параметров [8].

В дальнейшем для краткости будем номеровать индексом  $i$  величины, относящиеся к элементам и соответствующим оксидам.

Обозначив через  $C_i$  ( $i=1, n$ ),  $C_0$  концентрации  $i$ -го элемента-раскислителя и кислорода, соответственно, через  $f_i$  ( $i=1, n$ ),  $f_0$  — их коэффициенты активности,  $\gamma_i$  — коэффициенты активности оксидов в расплавленном шлаке относительно стандартного состояния чистых оксидов, определяем константы равновесия  $K_i$  реакций (6) образования  $i$ -го оксида по формуле:

$$K_i = \frac{x_i \gamma_i}{C_i^m C_0^n f_i^m f_0^n}, \quad (11)$$

где  $x_i$  — мольные доли компонентов оксидной фазы.

Набор соотношений (11) представляет собой систему уравнений относительно мольных долей компонентов оксидной фазы, в результате решения которой, учитывая вычисленные коэффициенты активностей, получим уточненное содержание кислорода в стали и соответствующий состав шлаковой фазы, образовавшейся при определенных равновесных условиях.

Рассчитанный состав оксидной фазы составляет (мас. %):

$$X_i (\%) = \frac{x_i M_i}{\sum_{i=1}^n x_i M_i},$$

где индексом  $i$  обозначены такие оксиды элементов в шлаке: FeO, MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO и др.;  $M_i$  — молекулярная масса соответствующего оксида.

**Алгоритм численной реализации задачи (1)–(6) и расчетная модель.** Основной сложностью в процессе решения задачи (1)–(6) является необходимость учета граничного условия (4) на подвижной межфазной поверхности. Для этого применяли метод сеток численного решения задач этого типа в так называемом варианте «ловли» неизвестной границы раздела расплав-включение в узел дискретной сетки, использованный ранее в работе [4] для задачи с одним диффузионным уравнением.

Поскольку в математической модели (1)–(6) диффузионные уравнения в системе связаны только через условие на подвижной границе (4), то указанное условие можно использовать для итерационного уточнения шага по времени, что позволяет рассматривать на каждом временном шаге диффузионные уравнения (1) как независимые.

Чтобы решить поставленную задачу разностным методом, образуем равномерную по радиальной координате  $r$  сетку  $\omega$  с постоянным шагом  $h$ , которая в каждый момент времени  $t = t_k$  состоит из множества точек

$$\omega^{(k)} = \{r_i^{(k)} = a(t_k) + ih, i = \overline{0, M}\}.$$

Пусть промежуток времени  $\tau_k$  такой, что за время от  $t_k$  до  $t_{k+1} = t_k + \tau_k$  радиус включения изменился на величину шага сетки  $h$ , так что  $a(t_{k+1}) - a(t_k) = h$ . Тогда множество узлов сетки в момент времени  $t = t_{k+1}$  описывается выражением

$$\omega^{(k+1)} = \{r_i^{(k+1)} = r_{i+1}^{(k)}, i = \overline{0, M-1}\}.$$

Обозначив содержание произвольного компонента расплава через  $C_n = C_n(r, t)$  и используя стандартные обозначения, записываем дискретное уравнение, аппроксимирующее соответствующее дифференциальное уравнение в системе (1) на сетке  $\omega^{(k+1)}$ , в виде

$$\begin{aligned} \frac{C_{n,i}^{(k+1)} - C_{n,i+1}^{(k)}}{\tau_k} &= \frac{1}{\left(r_i^{(k+1)}\right)^2 h} \times \\ &\times \left[ d_{n,i+1/2}^{(k+1)} \left(r_i^{(k+1)} + \frac{h}{2}\right)^2 \frac{C_{n,i+1}^{(k+1)} - C_{n,i}^{(k+1)}}{h} - \right. \\ &\left. - d_{n,i-1/2}^{(k+1)} \left(r_i^{(k+1)} - \frac{h}{2}\right)^2 \frac{C_{n,i+1}^{(k+1)} - C_{n,i}^{(k+1)}}{h} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

$$i = \overline{1, M-2},$$

где

$$C_{n,i}^{(k+1)} = C_n \left( r_i^{(k+1)}, t_{k+1} \right),$$

$$C_{n,i}^{(k)} = C_n \left( r_i^{(k)}, t_k \right), \quad d_{n,i\pm 1/2}^{(k+1)} = D_n \left( T \left( t_k \pm \frac{\tau_k}{2} \right) \right).$$

Разностные аналоги граничных условий (2) и (5) имеют вид

$$C_{n,0}^{(k+1)} = C_{n,0}^{(k)}, \quad (13)$$

$$C_{n,M-1}^{(k+1)} = C_{n,M-2}^{(k)}. \quad (14)$$

Значение шага по времени  $\tau_k$ , в течение которого граница включения перемещается на один узел сетки, получаем как предел итераций по времени  $\tau_k^{(0)}, \tau_k^{(1)}, \tau_k^{(2)}, \dots, \tau_k^{(s)}$ . Указанный итерационный процесс уточнения шага по времени для перехода от  $k$ -го до  $(k+1)$ -го временного слоя реализован следующим образом:

1) в качестве начального приближения для  $\tau_k$  использовано значение шага по времени на предыдущем слое, т. е.  $\tau_k^{(0)} = \tau_{k-1}$ ;

2) имея значения  $\tau_k^{(s)}$ , решаем методом прогонки  $N$  систем линейных разностных уравнений вида (12)–(14) с  $\tau_k = \tau_k^{(s)}$  для  $n = \overline{1, N}$  и определяем тем самым значения  $C_{n,i}^{(k+1)}$ ; отметим, что при этом за время  $\tau_k^{(s)}$  до поверхности включения будет перенесено такое количество  $X_n$   $n$ -го компонента расплава:

$$X_n = 4\pi a^2(t_{k+1}) M_n d_{n,n,1/2}^{(k+1)} \frac{C_{n,1}^{(k+1)} - C_{n,0}^{(k+1)}}{h} \tau_k^{(s)};$$

3) решаем задачу (9)–(10) для расчета равновесных концентраций металлических элементов на границе  $a(t_{k+1})$ ;

4) исходя из найденного равновесного состава, вычисляем среднюю плотность включения  $c_{k+1}^{(s)}$  и массу  $m^{(s)}$  вещества, которая выделилась в слой толщиной  $h^{(s)}$ ;

5) если справедливо условие завершения итерационного процесса

$$\left| 1 - \tau_k^{(s)} / \tau_k^{(s-1)} \right| < \varepsilon,$$

для достаточно малых значений  $\varepsilon$  (например,  $\varepsilon = 10^{-4}$ ), то принимаем значение шага по времени  $\tau_k = \tau_k^{(s)}$  и переходим на следующий временной слой, если же это условие не выполняется, то следующее приближение  $\tau_k^{(s+1)}$  для временного слоя определяем из соотношения

$$4\pi r_{k+1}^{(s)} [a^3(t_{k+1}) - a^3(t_k)] / 3\tau_k^{(s+1)} = m^{(s)} / \tau_k^{(s)},$$

которое представляет собой разностный аналог условия (6);

б) в равенстве (11) устанавливаем  $C_{n,0}^{(k+1)} = C_{n, \text{равн}}^{(s)}$  и возвращаемся к п. 2).

**Пример результатов расчета.** Компьютерную реализацию разработанной расчетной модели выполнили с помощью системы программирования Visual C++.

На рис. 1, 2 представлены графические иллюстрации соответствующих вычислений по созданной компьютерной программе для одного из 20 исследованных вариантов металла швов, наплавленных методом дуговой сварки с использованием экспериментальных флюсов в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO 6847 [10].

Полное изложение условий проведения сравнительного анализа, а также расчетных и экспериментальных результатов требует отдельного рассмотрения в следующей публикации.

Входными параметрами в процессе численного оценивания начального содержания легирующих элементов в сварочной ванне выступили следующие величины:

химический состав флюса, представленный в оксидном виде; считали, что первоначальный состав шлаковой системы совпадает с составом флюса и содержит такие (все или некоторые из перечисленных далее) компоненты:  $\text{SiO}_2 = 40\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 40\%$ ,  $\text{CaF}_2 = 20\%$ ,  $\text{MgO} = 0\%$ ,  $\text{MnO} = 0\%$ ,  $\text{TiO}_2 = 0\%$ ,  $\text{CaO} = 0\%$ , сумма процентных содержаний которых должна быть равна 100 %;

содержание легирующих элементов в стали, мас. %: 0,88 Si, 0,001 Ti, 0,64 Mn, 0,02 Al;

содержание легирующих элементов в сварочной проволоке, мас. %: 0,065 Si, 0,01 Ti, 0,98 Mn, 0,002 Al;

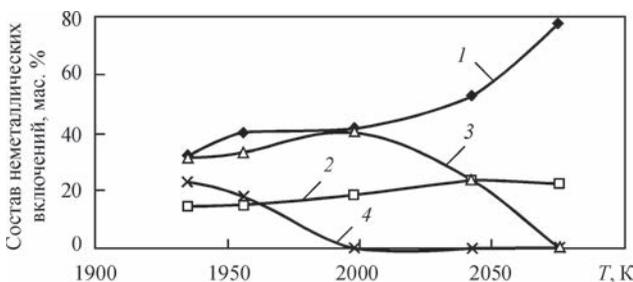


Рис. 1. Изменение состава неметаллических включений при остывании сварочной ванны: 1 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2 —  $\text{TiO}_2$ ; 3 —  $\text{MnO}$ ; 4 —  $\text{SiO}_2$

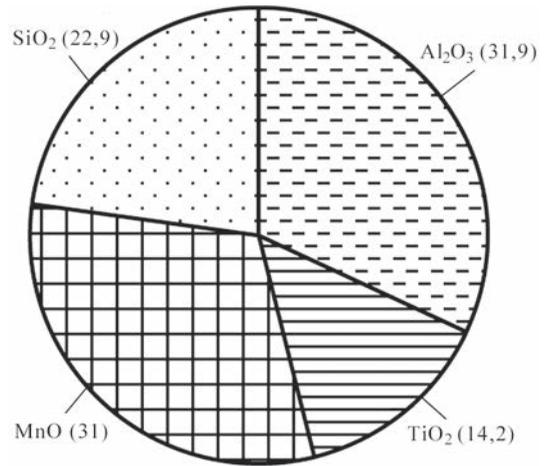


Рис. 2. Результаты расчета конечного состава неметаллических включений в наплавленном металле, мас. %

содержание кислорода, мас. %: в стали 0,02 и проволоке — 0;

относительная доля (0,33) участия основного металла в металле сварочной ванны;

температурные характеристики моделируемого процесса рассчитывали по методике Н. Н. Рыкалина.

### Выводы

На основе физико-химического описания процесса формирования эндогенных неметаллических многокомпонентных включений в металле сварного шва разработана математическая модель рассматриваемого процесса. В математической модели учтены кинетика и гетерогенность процесса, в частности, нестационарный диффузионный перенос реагентов (в частности, элементов-раскислителей) к поверхности включения и реакции на межфазной поверхности расплав-включение, а также наличие двухфазной зоны во время кристаллизации сварного шва. Математическая модель представляет собой нестандартную нелинейную краевую задачу для системы диффузных уравнений со специфическим условием на подвижной межфазной поверхности.

На основе математической модели создана расчетная модель, которая предусматривает термодинамический расчет локального равновесного состояния на межфазной подвижной поверхности и численное решение краевой задачи для системы дифференциальных уравнений параболического типа на основе дискретизации с помощью метода сеток в варианте ловли подвижной границы в узел сетки.

Созданная соответствующая компьютерная программа может быть использована для численного прогнозирования в вычислительном эксперименте размера и состава оксидных (после соответствующей переработки — также оксисульфидных) неметаллических включений в зависи-

мости от концентрационного и теплового режимов в сварочной ванне.

**Список литературы**

1. Губенко С. И., Парусов В. В., Деревянченко И. В. (2005) *Неметаллические включения в стали*. Днепр, АРТ-ПРЕСС.
2. Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Рыбальченко Н. Д. и др. (2017) Влияние неметаллических включений в низколегированной углеродистой стали на ресурс трубопроводов АЭС. *Вопросы атомной науки и техники*, 4(110), 59–64.
3. Мясникова А. А. (2012) Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке. *Master's Journal*, 1, 50–54.
4. Hong T., Debroy T., Babu S. S., David S. A. (2000) Modeling of Inclusion Growth and Dissolution in the Weld Pool. *Metallurgical and materials transactions B*, 31B, 1, 161–169.
5. Kwon You-Jong, Zhang Jian, Lee Hae-Geon. (2008) A CFD-based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle during Molten Steel Deoxidation. *ISIJ International*, 48, 7, 891–900.
6. Головки В. В., Тараборкин Л. А. (2016) Моделирование химического состава металла ванны при дуговых способах сварки. *Автоматическая сварка*, 1, 14–18.
7. Hong T., DebRoy T. (2001) Time-temperature-transformation diagrams for the growth and dissolution of inclusions in liquid steels. *Scripta Materialia*, 44, 5, 847–852.
8. Григорян В. А., Стомахин А. Я., Пономаренко А. Г. и др. (1989) *Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов*. Москва, Металлургия.
9. Походня И. К., Демченко В. Ф., Демченко Л. И. (1979) *Математическое моделирование поведения газов в сварных швах*. Киев, Наукова думка.
10. (2015) ДСТУ ISO 6847:2015 (ISO 6847:2013, IDT) *Матеріали зварювальні. Направлення шару металу для хімічного аналізу*.

**References**

1. Gubenko, S.I., Parusov, V.V., Derevyanchenko, I.V. (2005) *Nonmetallic inclusions in steel*. Dnepr, ART-PRESS [in Russian].
2. Ozhigov, L.S., Mitrofanov, A.S., Rybalchenko, N.D. et al. (2017) Influence of nonmetallic inclusions in low-alloy carbon steel on service life of NPP pipings. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, 4(110), 59-64 [in Russian].
3. Myasnikova, A.A. (2012) Nonmetallic inclusions and their influence on welded joint quality in manual arc welding. *Master's J.*, 1, 50-54.
4. Hong, T., Debroy, T., Babu, S.S., David, S.A. (2000) Modeling of inclusion growth and dissolution in the weld pool. *Metallurg. and Mater. Transact. B*, 31B, 1, 161-169.
5. Kwon Yu-Jong, Zhang Jian, Lee Hae-Geon (2008) A CFD-based nucleation-growth-removal model for inclusion behavior in a gas-agitated ladle during molten steel deoxidation. *ISIJ Int.*, 48(7), 891-900.
6. Golovko, V.V., Taraborkin, L.A. (2016) Modelling of chemical composition of weld pool metal in arc methods of welding. *The Paton Welding J.*, 1, 12-16.
7. Hong, T., Debroy, T. (2001) Time-temperature-transformation diagrams for the growth and dissolution of inclusions in liquid steels. *Scripta Materialia*, 44(5), 847-852.
8. Grigoryan, V.A., Stomakhin, A.Ya., Ponomarenko, A.G. et al. (1989) *Physical-chemical calculations of electric steelmaking processes*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Pokhodnya, I.K., Demchenko, V.F., Demchenko, L.I. (1979) *Mathematical modeling of gas behavior in welds*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

10. (2015) DSTU ISO 6847:2015 (ISO 6847:2013, IDT): *Welding consumables. Deposition of a weld metal pad for chemical analysis* [in Ukrainian].

Л. А. Тараборкин, В. В. Головки

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

**РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ  
НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ  
БАГАТОШАРОВОЇ МОРФОЛОГІЇ  
В МЕТАЛІ ЗВАРНОГО ШВА**

Метою роботи було створення розрахункової моделі для практичного прогнозування кінетики формування багатокомпонентних ендогенних неметалевих включень у металі зварного шва. Відповідна запропонована математична модель являє собою нестандартну крайову задачу для системи рівнянь типу реакційної дифузії зі специфічною умовою на рухомій міжфазній межі розплав–включення й урахує кінетику та гетерогенність процесу в умовах реального термічного циклу зварювання. Створена як комп'ютерна реалізація розробленої моделі розрахункова програма дозволяє оцінювати в обчислювальному експерименті розмір і склад оксидних ендогенних неметалевих включень залежно від концентраційного й теплового режимів у зварній ванні. Бібліогр. 10, рис. 2.

*Ключові слова:* дугове зварювання, зварна ванна, неметалеві включення, математична модель, прогнозування

L.A. Taraborkin, V.V. Golovko

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

**CALCULATION MODEL OF FORMATION  
OF NONMETALLIC INCLUSIONS OF MULTILAYER  
MORPHOLOGY IN WELD METAL**

The objective of the work was development of a calculation model for practical prediction of the kinetics of formation of multicomponent endogenous nonmetallic inclusions in weld metal. The proposed mathematical model is a nonstandard nonlinear boundary problem for a system of diffusion equations with the specific condition on the moving melt-inclusion interphase, and allows for the kinetics and heterogeneity of the process under the conditions of the real thermal cycle of welding. The calculation program developed as a computer realization of the developed model allows evaluation in a computational experiment the size and composition of oxide endogenous nonmetallic inclusions, depending on concentrational and thermal mode in the weld pool. 10 Ref., 2 Fig.

*Keywords:* weld pool, nonmetallic inclusions, mathematical model, prediction

Поступила в редакцію 18.12.2018

# ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ СВАРКИ, НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА\*

Л. И. МАРКАШОВА, В. Д. ПОЗНЯКОВ, В. Д. ШЕЛЯГИН, Е. Н. БЕРДНИКОВА,  
А. В. БЕРНАЦКИЙ, Т. А. АЛЕКСЕЕНКО

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

На основе исследований особенностей формирования структурных параметров в сварных соединениях высокопрочной стали, выполненных различными способами сварки плавлением (лазерной, дуговой и гибридной лазерно-дуговой) сделаны оценки влияния формирующихся структур и фазовых составляющих на изменение наиболее значимых механических свойств сварных соединений. Показана роль структурных факторов (легирования, фазовых составляющих, зеренной, субзеренной структуры, распределения и плотности дислокаций, фазовых выделений, их размеров и характера распределения) в обеспечении оптимальных свойств сварных соединений и их эксплуатационной надежности. Показано, что наиболее значимыми структурно-фазовыми параметрами и факторами, обеспечивающими в эксплуатационных условиях необходимый комплекс свойств сварных соединений — прочность ( $\sigma_r$ ), вязкость разрушения ( $K_{IC}$ ) и трещиностойкость ( $\tau_{вн}$ ), являются мелкозернистость зеренной и субзеренной структуры; диспергирование фазовых выделений при равномерном их распределении; отсутствие протяженных дислокационных скоплений — потенциальных концентраторов внутренних напряжений (зон зарождения и распространения трещин). Библиогр. 23, рис. 6.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, дуговая сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, высокопрочная сталь, сварные соединения, структура, фазовый состав, механические свойства, вязкость разрушения, трещиностойкость

В мировой практике, при изготовлении металлоконструкций тяжелонагруженных машин и механизмов широко применяются высокопрочные стали с пределом текучести 700 МПа и выше. Как правило, сварные соединения, изготовленные из таких сталей, хорошо сопротивляются статическим и динамическим нагрузкам как при положительных, так и при отрицательных температурах [1–5].

Для изготовления сварных конструкций из высокопрочных сталей чаще всего используется механизированная или автоматизированная сварка в среде защитных газов, преимущественно смесь на основе аргона с добавками 18...22 % углекислого газа. Реже для этих целей применяется автоматическая сварка под слоем флюса. При ремонте и монтаже конструкций из высокопрочных сталей все еще широко используется ручная дуговая сварка покрытыми электродами.

Как правило, для механизированной сварки в среде защитных газов применяются сплошные и порошковые проволоки малого диаметра (1,2...1,4 мм), а также ограничения режимов сварки ( $I_{св} = 160...220$  А;  $U_d = 21...28$  В;  $v_{св} =$

$= 12...25$  м/ч). При таких условиях сварки скорость охлаждения металла ЗТВ сварных соединений ( $w_{6/5}$ ) в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита (для высокопрочных сталей это 600...500 °С) может изменяться в широких пределах, от 10 до 40 °С/с. Это позволяет обеспечить металлу шва сварных соединений высокопрочных сталей требуемую прочность, пластичность и ударную вязкость, в том числе и при отрицательных температурах.

Главный недостаток указанного процесса сварки заключается в низкой его производительности. Поэтому в последнее время, применительно к сварке высокопрочных сталей, активно ведется поиск новых, более производительных процессов. К таким процессам могут быть отнесены лазерная и гибридная лазерно-дуговая сварки. По сравнению с дуговой сваркой эти процессы позволяют увеличить производительность сварки в несколько раз [6–8]. Достигается это как за счет увеличения мощности источника лазерного излучения, так и за счет увеличения скорости его перемещения вдоль стыка до 50...110 м/ч.

Однако, как известно [9–11], изменение технологических режимов сварки может привести к существенным изменениям структуры металла

\* В работе принимали участие А. В. Сиора, Е. В. Половецкий.

\* По материалам доклада на VIII Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 10–16 сентября 2017 г., Одесса).

швов и ЗТВ сварных соединений, а соответственно и к изменению их механических свойств. Применительно к высокопрочным сталям эти вопросы остаются мало изученными.

В связи с этим целью представленной работы являлось: исследование влияния структуры и фазового состава металла в зоне сварки в соединениях высокопрочной стали, выполненных различными способами сварки (дуговая, гибридная лазерно-дуговая, лазерная), на изменение наиболее значимых эксплуатационных свойств сварных соединений.

Для решения поставленных задач выполнены исследования на всех структурных уровнях (методами оптической металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии) изменений структурно-фазового состояния, а также плотности дислокаций в различных зонах сварных соединений, при различных сварочных режимах. На базе выполненных экспериментальных исследований сделана аналитическая оценка роли структурно-фазовых изменений в металле соединений на формирование наиболее значимых эксплуатационных свойств сварных соединений: прочности ( $\sigma_T$ ), вязкости разрушения ( $K_{IC}$ ), а также трещиностойкости, обусловленной уровнем локальных внутренних напряжений ( $\tau_{вн}$ ) с учетом распределения плотности дислокаций ( $\rho$ ).

**Материалы и методики исследований.** Исследования выполнены на образцах высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ (мас. %: 0,183 С; 1,19 Cr; 0,98 Mn; 2,07 Ni; 0,22 Мо; 0,08 V; 0,33 Si; не более 0,018 P и 0,005 S) толщиной до 10 мм. В случае дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварки использовали сварочную проволоку сплошного сечения марки Св-10ХН2ГСМФТЮ (мас. %:  $\leq 0,1$  С; 0,7 Cr; 0,4 Mn; 0,22 Мо; 0,15 V; 0,24 Si; 0,007 S). Лазерную сварку осуществляли без использования присадочных материалов. Сварные соединения получали на следующих режимах сварки.

*Дуговая сварка.* Сварка осуществлялась в жестком контуре при скоростях сварки: 1-й режим —  $v_{св} = 18$  м/ч; 2-й режим — 30 м/ч; 3-й режим — 40 м/ч; 4-й режим — 50 м/ч. Скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур 600...500 °С соответственно составляла:  $w_{6/5} \approx 10...12$  °С/с; 19...22; 25...28; 38;  $I_{св} = 220...240$  А;  $U_d = 30...32$  В.

*Гибридная лазерно-дуговая сварка:* 1-й режим —  $v_{св} = 72$  м/ч,  $I_{св} \sim 125$  А,  $U_d \sim 23$  В; 2-й режим —  $v_{св} = 90$  м/ч,  $I_{св} \sim 150$  А,  $U_d \sim 25$  В; 3-й режим —  $v_{св} = 110$  м/ч,  $I_{св} \sim 200$  А,  $U_d \sim 26$  В. Приведенные режимы обеспечивают охлаждение металла ЗТВ в интервале температур 600...500 °С со скоростью  $w_{6/5} \approx 58...62$  °С/с. В качестве источника лазерного излучения использовали Nd:

YAG-лазер DY 044 (Rofin Synar, Германия) мощностью излучения до 4,4 кВт и защитный газ (смесь Ar + CO<sub>2</sub> с расходом 15...20 л/мин).

*Лазерная сварка.* Сварные соединения получали в условиях различных скоростей сварки: 1-й режим —  $v_{св} = 18$  м/ч; 2-й режим —  $v_{св} = 30$  м/ч; 3-й режим —  $v_{св} = 50$  м/ч и, соответственно, скоростей охлаждения металла ЗТВ:  $w_{6/5} \approx 28; 50; 103$  °С/с.

**Методы структурных исследований.** Исследования структурно-фазовых и концентрационных изменений химических элементов, характера распределения и плотности дефектов кристаллической решетки в металле шва и ЗТВ сварных соединений изучали с использованием комплекса экспериментальных методов современного физического металловедения, включая оптическую металлографию (микроскопы «Versamet-2» и «Neophot-32»), аналитическую растровую электронную микроскопию (SEM-515, фирмы PHILIPS, Нидерланды) и просвечивающую электронную микроскопию (JEM-200CX, фирмы JEOL, Япония) (рис. 1). Твердость измеряли на микротвердомере М-400 фирмы «Лесо» при нагрузке 0,1 кг.

**Результаты исследований.** Изменения структурно-фазового состава в зоне сварки свариваемого материала (сталь 14ХГН2МДАФБ) в зависимости от режимов сварки представлены на рис. 2 и 3. Так, в случае дуговой сварки ( $v_{св} = 18...50$  м/ч) в металле швов (рис. 2, а; рис. 3, а, б) наблюдается формирование структурного состояния следующего типа: до 45...65 % бейнита верхнего ( $B_v$ ); 5...10 % мартенсита (М); 10...20 % феррита (Ф) и 10...35 % бейнита нижнего ( $B_n$ ). При переходе к участку перегрева (I ЗТВ) наблюдаются следующие изменения типов структур и их объемной доли: 20...45 %  $B_v$ ; 15...20 % М; 5 % Ф и 30...45 %  $B_n$  с характерной структурой основного металла бейнитно-ферритного типа. При этом, в случае  $v_{св} = 18$  м/ч в металле шва вдоль межзеренных границ, преимущественно по границам  $B_v$ , формируются протяженные дислокационные скопления до  $\rho = (1...2) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, что создает в таких элементах структуры высокий градиент плотности дислокаций (рис. 2, а). Такие структурные изменения могут приводить к неравномерному уровню механических свойств по зоне сварки и снижению трещиностойкости сварных соединений.

Таким образом, наиболее существенные (с точки зрения снижения трещиностойкости) структурно-фазовые изменения (крупнозернистая градиентная структура преимущественно  $B_v$ ) характерны для сварных соединений, выполненных на режимах дуговой сварки при  $v_{св} = 18$  м/ч.

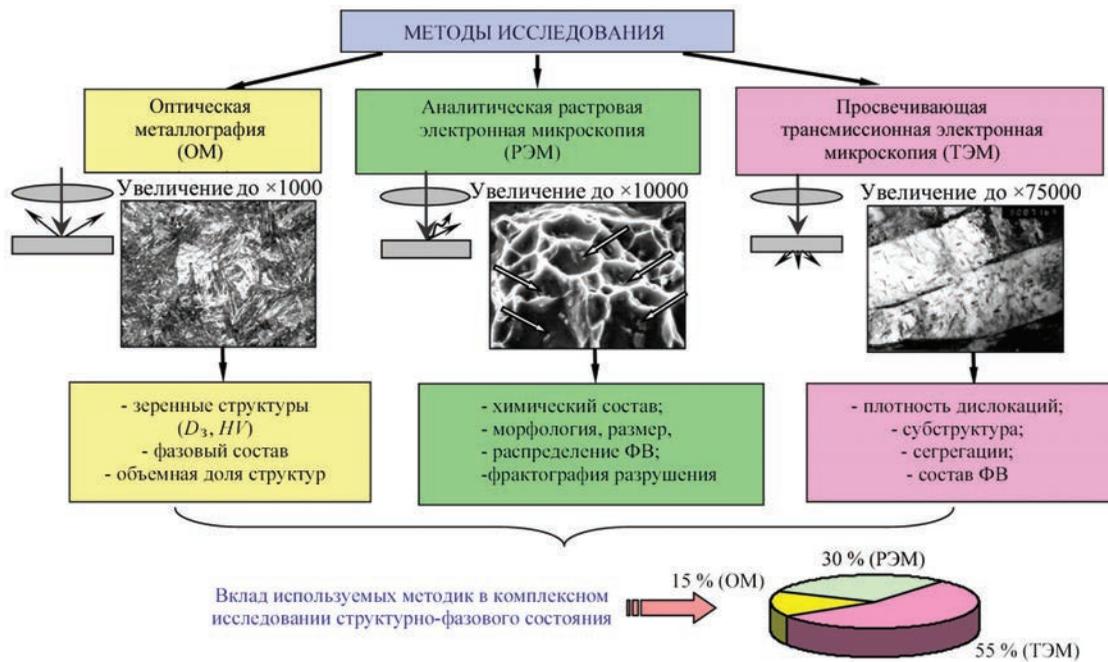


Рис. 1. Блок-схема комплексных методов исследований

Исследованиями структуры и фазового состава сварных соединений стали 14ХГН2МДАФБ при гибридной лазерно-дуговой сварке показано, что при переходе от  $v_{св} = 72$  до 110 м/ч фазовый состав металла швов и участка перегрева ЗТВ сохраняется аналогичным (бейнитно-мартенситный), однако заметно уменьшается объемная доля  $B_n$  (до 10...20%). В случае перехода к  $v_{св} = 110$  м/ч увеличивается интегральное значение дислокационной плотности до  $\rho = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и формируется преимущественно структура  $B_v$ .

Наиболее равномерное распределение дислокационной плотности ( $\rho = (4...6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) характерно для структур  $B_n$  при  $v_{св} = 72$  м/ч (рис. 2, б; рис. 3, в, з).

В случае лазерной сварки исследованиями показано, что при увеличении скорости сварки от  $v_{св} = 18$  до 50 м/ч изменяется фазовый состав металла шва от бейнитно-ферритного до бейнитно-мартенситного (рис. 3, д, е). Причем, и это следует подчеркнуть, формируется преимущественно мелкозернистая равноосная зеренная структура  $B_n$  в условиях равномерного перераспределения объ-

емной плотности дислокаций ( $\rho = (8...9) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) (рис. 2, в).

Таким образом, исследования показали, что в условиях изменения режимов сварки (от дуговой до гибридной и лазерной) изменяется соотношение формирующихся в зонах сварки фазовых составляющих ( $B_n, B_v, M$ ), их параметров, объемной доли, а также плотности и распределения дислокаций. Так, в условиях дуговой сварки формируются преимущественно структуры  $B_v$  при общем увеличении размеров зеренной, субзеренной структур с неравномерным распределением плотности дислокаций. Переход к режимам гибридной лазерно-дуговой и лазерной сварки способствует преимущественному формированию структур  $B_n$  при значительном измельчении зерна, субзерна с равномерным распределением объемной и зерно-границной плотности дислокаций.

**Аналитические оценки эксплуатационных свойств сварных соединений.** На базе исследований структурно-фазовых изменений при различных режимах сварки выполнены аналитические оценки наиболее значимых эксплуатационных

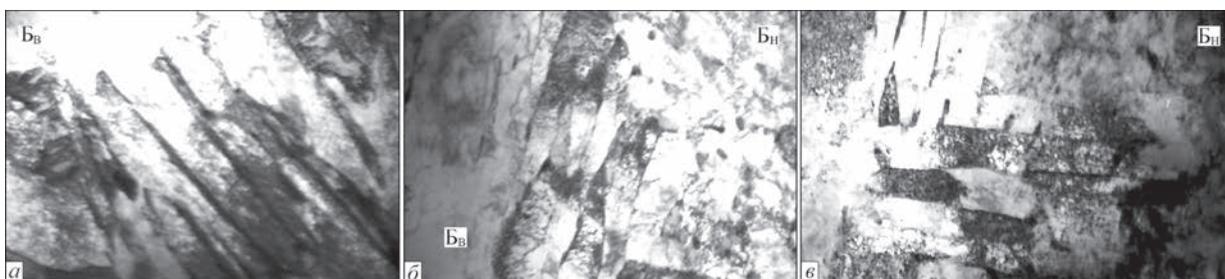


Рис. 2. Тонкая структура ( $\times 30000$ ) металла швов сварных соединений в условиях различных режимов сварки: а — дуговая; б — гибридная лазерно-дуговая; в — лазерная

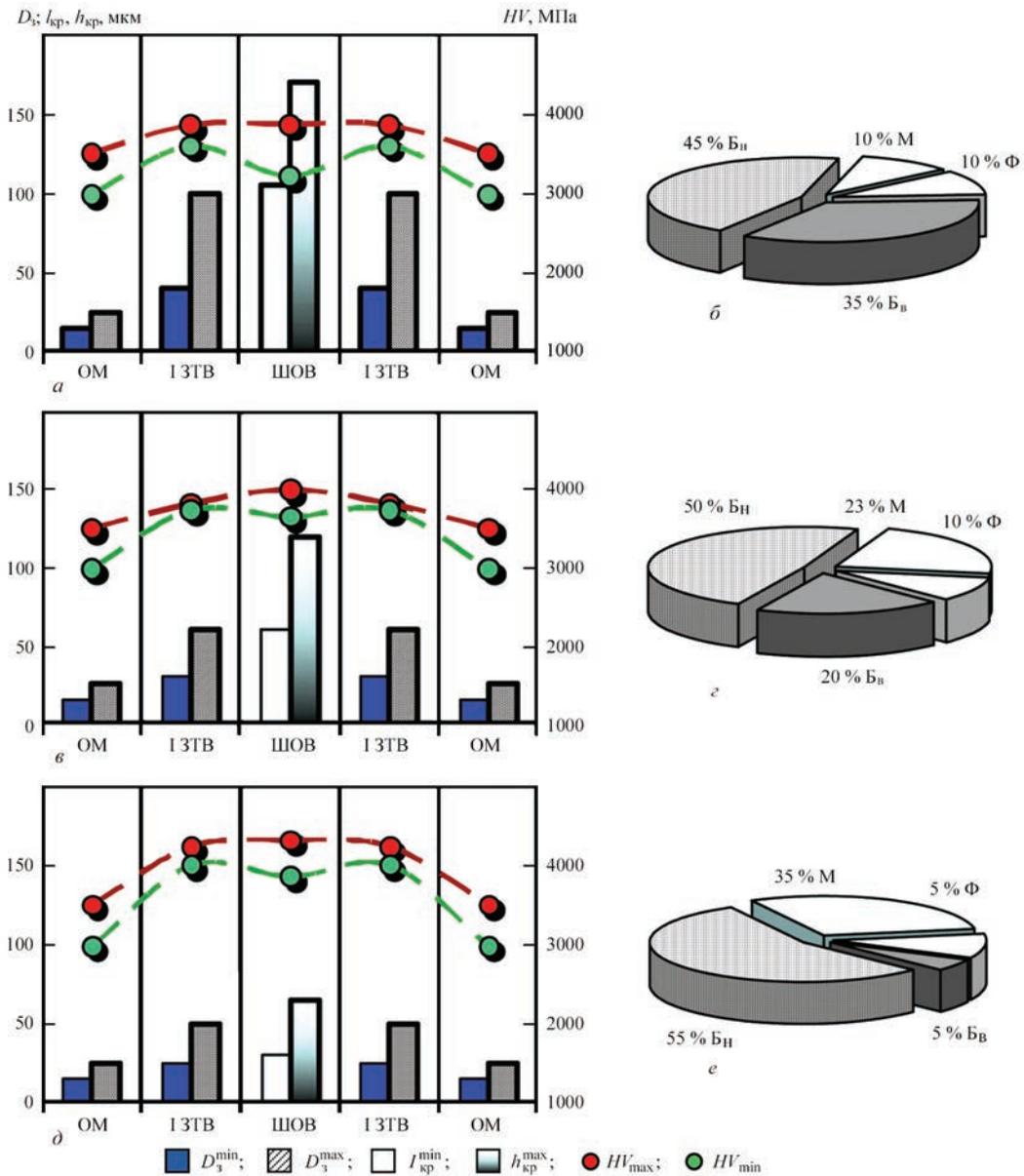


Рис. 3. Изменение структурных параметров формирующихся фазовых составляющих ( $B_H$ ,  $B_B$ ,  $\Phi$ ,  $M$ ) при различных режимах сварки ( $a$ ,  $б$  — дуговая,  $v_{св} = 40$  м/ч;  $в$ ,  $з$  — гибридная лазерно-дуговая,  $v_{св} = 72$  м/ч;  $д$ ,  $е$  — лазерная,  $v_{св} = 50$  м/ч):  $a$ ,  $в$ ,  $д$  — изменение размеров зерен ( $D_3$ ), ширины ( $h_{кр}$ ) и длины ( $l_{кр}$ ) кристаллитов, микротвердости ( $HV$ ) в основном металле (ОМ), в металле швов (ШОВ), участках крупного зерна (I ЗТВ);  $б$ ,  $з$ ,  $е$  — объемная доля (%) фазовых составляющих

свойств сварных соединений — показателей прочности, вязкости и трещиностойкости [12–18].

Аналитические оценки упрочнения  $\sum\sigma_T$  проводили согласно известным зависимостям Холла–Петча, Орована и др. [14–19]:  $\sum\sigma_T = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{тр.р.} + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_{д.у.}$ , где  $\Delta\sigma_0$  — сопротивление типа решетки металла движению свободных дислокаций (напряжение трения решетки или напряжение Пайерлса–Набарро);  $\Delta\sigma_{тр.р.}$  — упрочнение твердого раствора легирующими элементами (зависимость Мотта–Набарро);  $\Delta\sigma_3$ ,  $\Delta\sigma_c$  — упрочнение за счет изменения величины зерна и субзерна (зависимость Холла–Петча);  $\Delta\sigma_d$  — дислокационное упрочнение, обусловленное

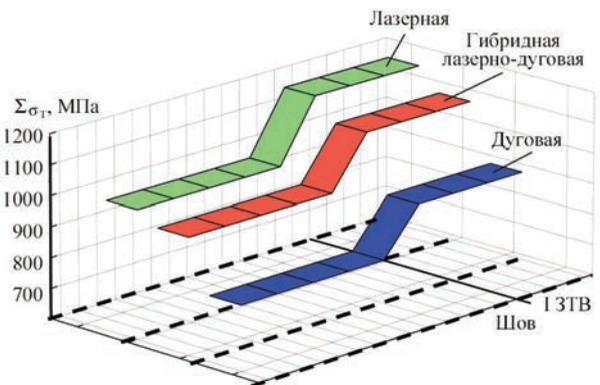


Рис. 4. Изменение средней расчетной величины  $\sum\sigma_T$  по зонам сварных соединений (I ЗТВ) (шов, I ЗТВ) стали 14ХГН2МДАФБ при различных режимах сварки

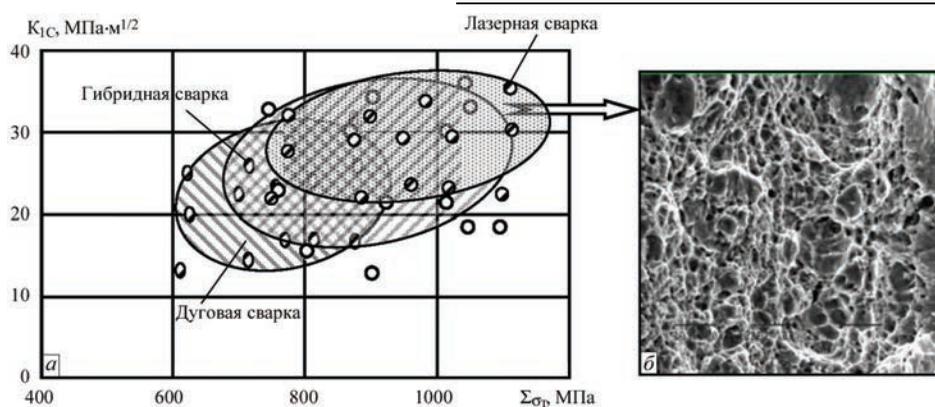


Рис. 5. Изменение расчетных значений прочности  $\Sigma\sigma_T$  и вязкости  $K_{1C}$  (а) металла сварных швов при дуговой сварке, гибридной лазерно-дуговой, лазерной и фрактограмма (б) вязкого разрушения сварного соединения, полученного лазерной сваркой ( $\times 2020$ )

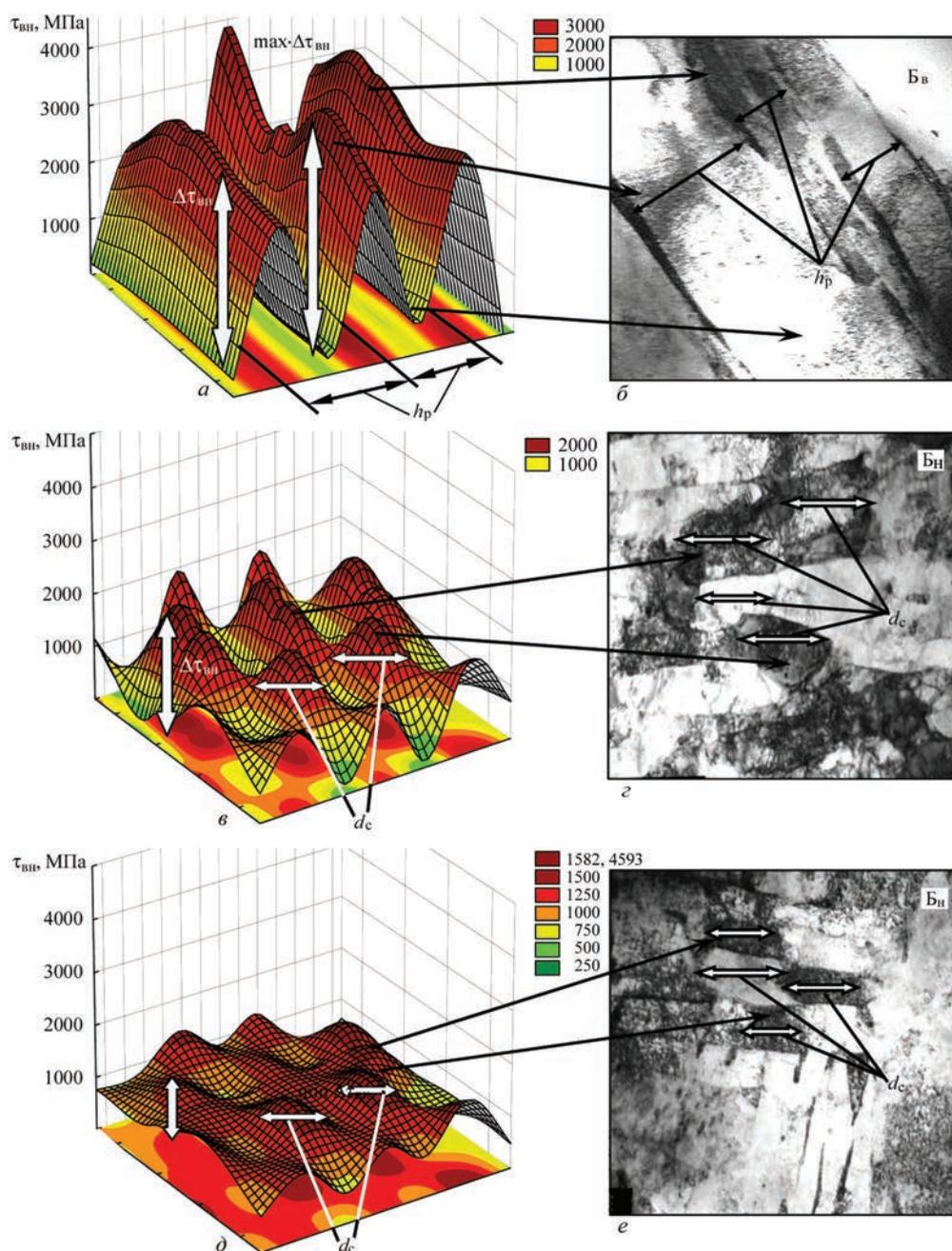


Рис. 6. Распределение локальных внутренних напряжений ( $\tau_{вн}$ ) в металле сварных соединений в структурных зонах: а, б —  $B_B$  при дуговой сварке; в, з —  $B_H$  при гибридной лазерно-дуговой сварке; д, е —  $B_H$  при лазерной сварке (б, з, е,  $\times 30000$ )

междислокационным взаимодействием, по теории Дж. Тейлора, А. Зегера, Н. Мотта и Г. Хирша;  $\Delta\sigma_{д.у.}$  — дисперсионное упрочнение за счет дисперсных фазовых составляющих по Оровану.

Расчетные значения показателей вязкости разрушения  $K_{1C}$ , оценивали по зависимости Краффта [20]:  $K_{1C} = (2E\sigma_T\delta_k)^{1/2}$ , где  $E$  — модуль Юнга;  $\sigma_T$  — расчетная величина упрочнения;  $\delta_k$  — значение критического раскрытия трещины (согласно данным параметров субструктуры).

Из анализа различных подходов к механизмам зарождения трещин и разрушения материалов выбрана оценка на базе дислокационной теории кристаллических твердых тел с учетом характера дислокационной структуры и ее распределения (дислокационные скопления либо равномерное распределение дислокаций) [21–23]. Поле внутренних напряжений, создаваемое дислокационной структурой (плотностью дислокаций) определяется зависимостью  $\tau_{вн} = Gbh\rho/[\pi(1-\nu)]$ , где  $G$  — модуль сдвига;  $b$  — вектор Бюргерса;  $h$  — толщина фольги;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — плотность дислокаций [22].

В результате выполненных оценок установлено следующее. В условиях дуговой сварки ( $v_{св} = 40$  м/ч) в металле шва и ЗТВ, соответственно, расчетное значение  $\sum\sigma_T = 741 \dots 890$  МПа (рис. 4). При этом показатель вязкости разрушения  $K_{1C}$  составляет около  $12 \dots 32$  МПа·м<sup>1/2</sup> (рис. 5). В условиях режимов гибридной лазерно-дуговой ( $v_{св} = 72$  м/ч) и лазерной сварки ( $v_{св} = 50$  м/ч)  $\sum\sigma_T = 850 \dots 1080$  МПа и  $\sum\sigma_T = 900 \dots 1120$  МПа, соответственно, при повышении (на 10...20 %) уровня вязкости разрушения (рис. 5). Последнее обусловлено преимущественным формированием структуры  $B_H$  при равномерном распределении плотности дислокаций  $\rho$  и отсутствии участков хрупкого скола на поверхности разрушения сварных соединений (рис. 5, б).

Расчетные оценки локальных внутренних напряжений  $\tau_{вн}$ , приведенные на диаграммах рис. 6 показывают следующее.

Протяженные зоны с максимальными значениями  $\tau_{вн}$  (1900...3700 МПа) формируются в условиях дуговой сварки (18 м/ч) вдоль межзеренных границ  $B_B$  в местах протяженных дислокационных скоплений ( $\rho = (1 \dots 2) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>), рис. 6, а, б. Это приводит к зарождению микротрещин в этих зонах и снижению трещиностойкости сварных соединений. Снижение значений  $\tau_{вн}$  характерно для сварных соединений, полученных на режимах гибридной сварки  $\tau_{вн} = 1470 \dots 1867$  МПа,  $\rho = 8 \cdot 10^{10} \dots 1 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> (рис. 6, в, з) при  $v_{св} = 72$  м/ч и особенно при режимах лазерной сварки  $\tau_{вн} = 1470 \dots 1663$  МПа,  $\rho = (8 \dots 9) \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> (рис. 6, д, е), чему способствует формирование в сварочной

зоне мелкозернистых и фрагментированных структур  $B_H$  в сочетании с равномерным распределением снижающейся плотности дислокаций.

В итоге установлено, что оптимальные свойства прочности, вязкости и трещиностойкости сварных соединений высокопрочных сталей обеспечиваются в условиях лазерной сварки ( $v_{св} = 50$  м/ч), что обусловлено формированием наиболее дисперсных структур —  $B_H$ , мелкозернистого отпущенного М при отсутствии протяженных дислокационных скоплений — концентраторов локальных внутренних напряжений  $\tau_{вн}$ .

## Выводы

1. Выполнены исследования структуры и эксплуатационных свойств сварных соединений высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ в зависимости от используемых режимов сварки (дуговая, гибридная лазерно-дуговая и лазерная).

2. Показано, что при различных условиях сварки стали 14ХГН2МДАФБ наблюдаются следующие преобразования структуры: изменяется соотношение формирующихся в зонах сварки фазовых составляющих ( $B_H$ ,  $B_B$ , М), а также их параметров и объемной доли. В условиях дуговой сварки формируются преимущественно структуры  $B_B$  при общем увеличении размеров зеренной и субзеренной структур с неравномерным их распределением и градиентной плотностью дислокаций.

3. Переход к режимам гибридной лазерно-дуговой и лазерной сварки способствует формированию структур  $B_H$  с резким измельчением зеренной, субзеренной структуры при равномерном распределении плотности дислокаций.

4. Анализ взаимосвязи: режимы сварки → структура → свойства свидетельствует о значительном повышении эксплуатационных свойств (прочности, вязкости разрушения, трещиностойкости) сварных соединений высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ при переходе к режимам лазерной сварки, что связано с преобладающим влиянием мелкозернистости формирующихся структур  $B_H$ , отсутствием плотных протяженных дислокационных скоплений с преобладанием в зоне сварки равномерного распределения дислокаций.

## Список литературы

1. Гордиенко Л. К. (ред.) (1965) *Высокопрочная сталь: сб. статей*. Москва, Металлургия.
2. Гудремон Э. (1959) *Специальные стали*. Москва, Металлургияиздат.
3. Шоршоров М. Х., Белов В. В. (1972) *Фазовые превращения и свойства стали при сварке*. Москва, Наука.
4. Madej K., Jachym R. (2017) Welding of High Strength Toughened Structural Steel S960QL. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2, 6–16.
5. Rózański M., Stano S., Grajcar A. (2016) Effect of Braze Welding Parameters on the Structure and Mechanical Properties of Joints Made of Steel CPW 800. Part 1: Arc Braze Welding. *Ibid.*, 6, 6–12.

6. Kah P., Salminen A., Martikainen J. (2010) Laser-arc hybrid welding processes (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 32–40.
7. Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. (2017) Laser Welding of the New Grade of Advanced High-Strength Steel DOMEX 960. *Materiali in tehnologije/Materials and technology*, **51(7)**, 199–204.
8. Liu F., Yu X., Huang C. et al. (2015) Microstructure and Mechanical Properties of AerMet 100 Ultra-high Strength Steel Joints by Laser Welding. *J. of Wuhan Univ. of Technology – Mater. Sci. Ed.*, **30(4)**, 827–830.
9. Keehan E., Zachrisson J., Karlsson L. (2010) Influence of cooling rate on microstructure and properties of high strength steel weld metal. *Science and Technology of Welding and Joining*, **15**, 233–238.
10. Svensson L.-E. (2007) Microstructure and Properties of High Strength Weld Metals. *Materials Science Forum*, **539-543**, 3937–3942.
11. Миходуй Л. И., Ющенко А. К., Позняков В. Д. и др. (1991) Свариваемость высокопрочной стали 12ГНЗМФА-ЮДР-СП. *Автоматическая сварка*, **11**, 12–16.
12. Маркашова Л. И., Позняков В. Д., Бердникова Е. Н. и др. (2016) Структура и свойства сварных соединений стали 14ХГН2МДАФБ при гибридной лазерно-дуговой сварке. *Там же*, **5/6**, 114–123.
13. Маркашова Л. И., Позняков В. Д., Бердникова Е. Н. и др. (2014) Влияние структурных факторов на механические свойства и трещиностойкость сварных соединений металлов, сплавов, композиционных материалов. *Там же*, **6/7**, 25–31.
14. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. (1986) *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Москва, Металлургия.
15. Конрад Г. (1973) Модель деформационного упрочнения для объяснения влияния величины зерна на напряженное течение металлов. *Сверхмелкое зерно в металлах*. Гордиенко Л. К. (ред.). Москва, Металлургия, сс. 206–219.
16. Petch N. J. (1953) The cleavage strength of polycrystalline. *J. Iron and Steel Inst.*, **173**, 25–28.
17. Orowan E. (1954) *Dislocation in metals*. New York, AIME.
18. Ashby M. F. (1983) Mechanisms of deformation and fracture. *Adv. Appl. Mech.*, **23**, 117–177.
19. Буша Ю., Карел В., Лонгауер С., Биллы И. (1977) О связи предела текучести сорбита со средним размером карбидов. *Физика металлов и металловедение*, **44(3)**, 604–610.
20. Романов О. Н. (1979) *Вязкость разрушения конструкционных сталей*. Москва, Металлургия.
21. Stroh A. N. (1954) The formation of cracks as a recoil of plastic flow. *Proc. of the Roy. Soc. A.*, **223(1154)**, 404–415.
22. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняева Ю. В. (1985) *Структурные уровни деформации твердых тел*. Сибирское отделение, Наука.
23. Conrad H. (1963) Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel. *Acta Metallurgica*, **11**, 75–77.
7. Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. (2017) Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel DOMEX 960. *Materials and Technology*, **51(7)**, 199–204.
8. Liu, F., Yu, X., Huang, C. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of AerMet 100 ultra-high strength steel joints by laser welding. *J. of Wuhan Univ. of Technology – Mater. Sci. Ed.*, **30(4)**, 827–830.
9. Keehan, E., Zachrisson, J., Karlsson, L. (2010) Influence of cooling rate on microstructure and properties of high strength steel weld metal. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **15**, 233–238.
10. Svensson, L.-E. (2007) Microstructure and properties of high strength weld metals. *Mat. Sci. Forum*, **539-543**, 3937–3942.
11. Mikhoduj, L.I., Yushchenko, A.K., Poznyakov, V.D. et al. (1991) Weldability of high-strength steel 12GN3MFAyUDR-SSh. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 12–16.
12. Markashova, L.I., Poznyakov, V.D., Berdnikova, E.N. et al. (2016) Structure and service properties of hybrid laser-arc welded joints of 14KhGN2MDAFB steel. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 104–113.
13. Markashova, L.I., Poznyakov, V.D., Berdnikova, E.N. et al. (2014) Effect of structural factors on mechanical properties and crack resistance of welded joints of metals, alloys and composite materials. *Ibid.*, **6-7**, 22–28.
14. Goldshtejn, M.I., Litvinov, V.S., Bronfin, B.M. (1986) *Metallophysics of high-strength alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
15. Conrad, H. (1973) Model of strain strengthening for explanation of grain size effect on yielding of metal. *Ultra-fine grain in metals*. Ed. by L.K. Gordienko. Moscow, Metallurgiya, 206–219 [in Russian].
16. Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystalline. *J. Iron and Steel Inst.*, **173**, 25–28.
17. Orowan, E. (1954) Dislocation in metals. New York, AIME.
18. Ashby, M.F. (1983) Mechanisms of deformation and fracture. *Adv. Appl. Mech.*, **23**, 117–177.
19. Busha, Yu., Karel, V., Longauer, C., Billy, I. (1977) About relation of yield strength of sorbite with medium size carbides. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **44(3)**, 604–610 [in Russian].
20. Romaniv, O.N. (1979) *Fracture toughness of structural steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
21. Stroh, A.N. (1954) The formation of cracks as a recoil of plastic flow. *Proc. of the Roy. Soc. A.*, **223(1154)**, 404–415.
22. Panin, V.E., Likhachev, V.A., Grinyayeva, Yu.V. (1985) *Structural levels of deformation of solids*. Siberian Depart., Nauka [in Russian].
23. Conrad, H. (1963) Effect of grain size on the lower and flow stress of iron and steel. *Acta Metallurgica*, **11**, 75–77.

## References

1. (1965) *High-strength steel*. In: *Transact.* Ed. by L.K. Gordienko. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Houdremont, E. (1959) *Special steels*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
3. Shorshorov, M.Kh., Belov, V.V. (1972) *Phase transformations and properties of steel in welding*. Moscow, Nauka [in Russian].
4. Madej, K., Jachym, R. (2017) Welding of high strength toughened structural steel S960QL. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **2**, 6–16.
5. Rozanski, M., Stano, S., Grajcar, A. (2016) Effect of braze welding parameters on the structure and mechanical properties of joints made of steel CPW 800. Pt 1: Arc braze welding. *Ibid.*, **6**, 6–12.
6. Cah, P., Salminen, A., Martikainen, J. (2010) Laser-arc hybrid welding processes (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 32–40.

Л. І. Маркашова, В. Д. Позняков, В. Д. Шелягін,  
О. М. Бердникова, А. В. Бернацький, Т. О. Алексеєнко

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

## ВПЛИВ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ, ВИКОНАНИХ РІЗНИМИ СПОСОБАМИ ЗВАРЮВАННЯ, НА ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

На основі досліджень особливостей формування структурних параметрів в зварних з'єднаннях високоміцної сталі, виконаних різними способами зварювання плавленням (лазерного, дугового і гібридного лазерно-дугового) зроблено оцінки впливу структур і фазових складових, що формуються на зміну найбільш важливих механічних властивостей зварних з'єднань. Показана роль структурних факторів (легування, фазових складових, зеренної, субзеренної структури, роз-

поділу і щільності дислокацій, фазових виділень, їх розмірів і характеру розподілу) в забезпеченні оптимальних властивостей зварних з'єднань і їх експлуатаційної надійності. Показано, що найбільш важливими структурно-фазовими параметрами і факторами, що забезпечують в експлуатаційних умовах необхідний комплекс властивостей зварних з'єднань — міцність ( $\sigma_T$ ), в'язкість руйнування ( $K_{1C}$ ) та тріщиностійкість ( $\tau_{in}$ ), є дрібнозернистість зеренної та субзеренної структури; диспергування фазових виділень при рівномірному їх розподілі; відсутність протяжних дислокаційних скупчень — потенційних концентраторів внутрішніх напружень (зон зародження і поширення тріщин). Бібліогр. 23, рис. 6.

*Ключові слова:* лазерне зварювання, дугове зварювання, гібридне лазерно-дугове зварювання, високоміцна сталь, зварні з'єднання, структура, фазовий склад, механічні властивості, в'язкість руйнування, тріщиностійкість

L. I. Markashova, V. D. Poznyakov, V. D. Shelyagin,  
E. N. Berdnikova, A. V. Bernatskii and T. A. Alekseenko

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

EFFECT OF METAL STRUCTURE  
OF HIGH-STRENGTH STEEL WELDED JOINTS  
PRODUCED USING DIFFERENT METHODS  
OF WELDING ON THEIR SERVICE PROPERTIES\*

Evaluations of effect of forming structures and phase constituents on change of the most significant mechanical properties of welded joints was carried out based on investigation of peculiarities of formation of structural parameters in welded joints of high-strength steel, produced by different methods of fusion welding (laser, arc and hybrid laser-arc). A role of structural factors (alloying, phase constituents, grain, subgrain structure, distribution and density of dislocations, phase precipitations, their size and nature of distribution) was shown in providing the optimum properties of the welded joints and their reliability of service. It is shown that the most significant structural-phase parameters and factors providing under operation conditions the necessary complex of properties of welded joints, namely strength ( $\sigma_y$ ), fracture toughness ( $K_{1C}$ ) and crack resistance ( $\tau_{in}$ ), are fineness of grain and subgrain structure; dispersion of phase precipitations at their uniform distribution; absence of extended dislocation accumulations — potential stress concentrators of internal stresses (zone of nucleation and propagation of cracks). Ref. 23, Fig. 6.

*Keywords:* laser welding, arc welding, hybrid laser-arc welding, high-strength steel, welded joints, structure, phase composition, mechanical properties, fracture toughness, crack resistance

Поступила в редакцію 04.12.2017

## Технический визит студентов

21 декабря 2017 г. группа студентов сварочного факультета НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» посетила авиастроительное предприятие «Аэропракт» в Киеве.

Предприятие работает с 1991 г. и в 2017 г. построило свой 1000-й самолет. Студенты с интересом ознакомились с изготовлением деталей самолета и с его сборкой. В небольшом самолете, собираемом в большей мере с использованием заклепочных и болтовых соединений, имелось место и для сварных деталей и узлов. Студенты посетили также конструкторское бюро предприятия. Небольшое предприятие самостоятельно выполняет проекты, изготавливает многие детали на современных металлорежущих станках с ЧПУ, собирает и выпускает в небо прекрасные самолеты. Чистого Вам неба!



Пост-релиз сварочного факультета

# ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, УПРОЧНЕННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

**В. В. КНЫШ, С. А. СОЛОВЕЙ, Л. И. НЫРКОВА, В. Н. МИРЯНИН**

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

В статье приведены результаты исследования эффективности применения технологии высокочастотной механической проковки для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений стали 15ХСНД при последующем длительном воздействии климатических факторов внешней среды, характерных умеренно холодному морскому климату. Влияние данного климата моделировали выдержкой соединений в камере соляного тумана КСТ-1 при температуре  $(35 \pm 2)$  °С и распылении раствора хлорида натрия 15 мин через каждые 45 мин. Продолжительность коррозионных испытаний образцов в камере КСТ-1 составила 1200 ч. После выдержки в камере КСТ-1 были проведены металлографические исследования поверхностного слоя металла шва и металла зоны термического влияния сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном данной технологией состояниях. Вычислены глубина и степень поражения коррозионными пятнами и кавернами поверхностных слоев металла швов и зон термического влияния сварных соединений. Экспериментально установлены характеристики сопротивления усталости сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном высокочастотной механической проковкой состояниях после воздействия нейтрального соляного тумана на протяжении 1200 ч. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* стыковое сварное соединение, нейтральный соляной туман, усталость, высокочастотная механическая проковка, повышение сопротивления коррозионной усталости

Благодаря высокой эффективности технология высокочастотной механической проковки (ВМП) широко применяется не только для повышения характеристик сопротивления усталости сварных соединений на стадии изготовления металлоконструкций, но и при ремонтно-восстановительных работах [1–5]. В мировой литературе технология ВМП получила и другие названия: «ультразвуковая ударная обработка» (ultrasonic impact treatment), «ультразвуковая проковка» (ultrasonic peening), «обработка высокочастотным механическим ударом» (high frequency mechanical impact treatment) [1–11]. Это связано с тем, что для выполнения проковки сварных соединений с высокой частотой удара бойка об обрабатываемую поверхность в оборудовании для ВМП используется энергия ультразвука. В статьях последних лет все чаще встречается расчет численным моделированием эффективности применения технологии ВМП в зависимости от состояния поверхностного слоя материала, технологических параметров обработки, наводимых остаточных напряжений сжатия и др. [6–8]. Данные расчетные модели предполагают, что поверхностный пластически деформированный технологией ВМП слой металла остается неизменным в процессе всего расчетного срока службы. Однако большинство сварных металлоконструкций (мосты, краны, подъемно-транспорт-

ные машины, железнодорожный транспорт и др.) в процессе длительной эксплуатации подвергаются одновременному воздействию внешнего переменного нагружения и коррозионно-агрессивных сред. Длительное воздействие коррозионных сред может привести к частичному или полному коррозионно-механическому уносу упрочненного слоя металла, снижению расчетных характеристик сопротивления усталости и, соответственно, к преждевременному разрушению конструкции [9, 10]. Так, в работе [9] исследованы характеристики сопротивления усталости стыковых сварных соединений железнодорожных рельс в исходном состоянии, после ВМП и после ВМП с последующей выдержкой на протяжении 450 ч в синтетической морской воде ( $105 \text{ г/л NaCl} + 12,7 \text{ г/л MgCl}_2 + 7,7 \text{ г/л MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + 12,15 \text{ г/л CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 0,5 \text{ г/л CaCO}_3$ ). Установлено, что предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^5$  циклов сварных соединений в исходном состоянии составляет 256 МПа, после ВМП — 314 МПа, а после ВМП с последующей выдержкой в коррозионной среде — 290 МПа. Несмотря на подробное описание в этой работе структуры сварных соединений в исходном состоянии и после ВМП, причины снижения предела ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^5$  циклов на 8 % после выдержки в коррозионной среде не исследуются. В работе [10]

экспериментально установлено, что выдержка в камере соляного тумана КСТ-1 (при температуре  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  и распылении раствора хлорида натрия 15 мин через каждые 45 мин) упрочненных ВМП тавровых сварных соединений стали 15ХСНД приводит к снижению их предела ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов примерно на 24,5 % (с 265 до 200 МПа). Это вызвано существенным разрушением упрочненного ВМП слоя металла (на некоторых участках оставались лишь следы упрочненного слоя металла). Несмотря на это, предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов упрочненных ВМП соединений на 48 % выше, чем неупрочненных. Результаты работ [9, 10] показывают, что исследование закономерностей сопротивления усталости упрочненных ВМП сварных соединений при длительном воздействии коррозионных сред и, соответственно, при определенном повреждении пластически деформированного слоя металла является актуальной задачей. Существенные коррозионные повреждения, характерные сварным соединениям металлоконструкций, эксплуатируемым в условиях умеренно холодного морского климата, как показано в работе [10], можно получить предварительной выдержкой сварных соединений в камере соляного тумана.

Цель настоящей работы — оценить эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений металлоконструкций при последующем длительном воздействии климатических факторов внешней среды, характерных умеренно холодному морскому климату.

**Материал и методика исследований.** Экспериментальные исследования проводили на образцах стыковых сварных соединений низколегированной стали 15ХСНД, которая широко применяется для изготовления элементов металлоконструкций длительной эксплуатации (например, в пролетных строениях железнодорожных и автомобильных мостов), имеет повышенную прочность, хорошо сваривается, устойчива в атмосферных условиях и работоспособна в диапазоне температур от  $-70$  до  $45^\circ\text{C}$ . Химический состав стали, мас. %: 0,142 С; 0,466 Si; 0,63 Mn; 0,020 S; 0,013 P; 0,31 Ni; 0,66 Cr; 0,34 Cu. Механические свойства:  $\sigma_T = 400$  МПа,  $\sigma_B = 565$  МПа,  $\delta_5 = 26$  %.

Заготовки под образцы стыковых сварных соединений вырезали из горячекатаного листового проката толщиной 12 мм 12 категории в направлении проката. Размер заготовок составлял  $600 \times 175$  мм. Стыковые сварные соединения получали двухсторонней односторонней автоматической сваркой пластин без разделки кромок (зазор по стыку 0...1,0 мм) под флюсом ОР 192 (фирмы

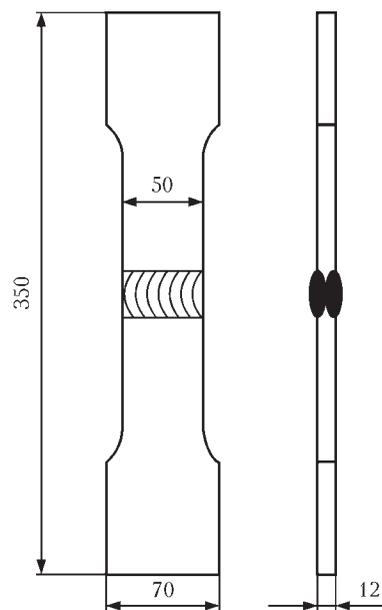


Рис. 1. Форма и геометрические размеры образца стыкового сварного соединения

Oerlikon) проволокой Св-08Г1НМА диаметром 4 мм. Сварку проводили на обратной полярности от электрического выпрямителя ВСЖ-1600. Режимы сварки первого шва:  $U = 55$  В,  $I = 650 \dots 700$  А,  $v = 26,7$  м/ч; а второго (с противоположной стороны):  $U = 57$  В,  $I = 760 \dots 780$  А,  $v = 26,7$  м/ч. Второй шов выполняли лишь после полного охлаждения первого шва. После сварки с каждой из полученных сварных пластин размером  $600 \times 350$  мм вырезали 8 образцов размером  $350 \times 70$  мм. Форма и геометрические размеры образцов стыковых сварных соединений приведены на рис. 1.

Экспериментальные исследования проводили на электрогидравлической машине УРС-20 при переменном растяжении с асимметрией цикла  $R_\sigma = 0$  и частотой 5 Гц. Критерием завершения испытаний служило полное разрушение образцов или превышение базы испытаний  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений.

Образцы испытывали в исходном и упрочненном ВМП состоянии после выдержки в коррозионной среде.

Упрочнение сварных соединений технологией ВМП проводили оборудованием USTREAT-1.0, в котором ручной компактный ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем соединен с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 Вт. При упрочнении сварных соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва в зону термического влияния (по линии сплавления). В качестве упрочнителя использовали однорядную четырехбойковую насадку с диаметром бойков 3 мм. Скорость выполнения ВМП при обработке стыковых сварных соединений составляла 2 мм/с, а амплитуда коле-

баний торца волновода ручного ударного инструмента — 25 мкм.

Для получения предварительных коррозионных повреждений сварные образцы помещали в камеру КСТ-1. Исследования проводили по ГОСТ 9.401-91 «ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов (метод 1, Б)» в камере соляного тумана КСТ-1 при температуре  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  при распылении раствора хлорида натрия 15 мин через каждые 45 мин исследований. Концентрация хлорида натрия в растворе —  $(50 \pm 5)$  г/дм<sup>3</sup>, *pH* — от 6,5 до 7,2, плотность — 1,03 г/см<sup>3</sup>. Электропроводность дистиллированной воды для приготовления раствора хлорида натрия — не более 20 мкОм/см при температуре  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Продолжительность пребывания сварных образцов в условиях влияния нейтрального соляного тумана составляла 1200 ч.

Металлографические исследования поверхностного слоя металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) стыковых сварных соединений после выдержки в камере КСТ-1 проводили на образцах в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях. Результаты металлографических исследований поверхностного слоя металла шва и ЗТВ аналогичных сварных соединений в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях до коррозионного влияния приведены в работе [11].

**Результаты исследований.** После выдержки в камере соляного тумана КСТ-1 на протяжении 1200 ч большинство образцов было покрыто сплошным слоем продуктов коррозии толщиной 1...2 мм. При этом на некоторых образцах вдали от сварного шва наблюдались участки с исходным горячекатаным поверхностным слоем металла светлого-черного цвета, которые не подверглись коррозии. Толстый слой продуктов коррозии пре-

пятствовал визуальному установлению места нахождения зоны проковки с характерной канавкой (рис. 2). При подготовке образцов к усталостным испытаниям продукты коррозии частично удаляли, до металлического блеска зачищали боковые грани и захватные части образцов. Рабочая часть образцов зачистке не подвергалась, в процессе усталостных испытаний продукты коррозии отслаивались. По всей площади поверхности образцов наблюдались коррозионные пятна с кавернами и каверны с питтингами внутри.

Поскольку усталостные трещины, как правило, образуются по линии сплавления, то исследовали коррозионные повреждения в зоне перехода металла шва в металл ЗТВ.

В неупрочненных сварных соединениях после выдержки в камере КСТ-1 в зоне перехода металла шва в металл ЗТВ как в металле шва, так и в металле ЗТВ образовались коррозионные повреждения в виде пятен и каверн глубиной 0,104...0,390 мм (рис. 3, а, б). Степень поражения коррозионными повреждениями металла шва и ЗТВ составила 53,7 и 100 %, соответственно (таблица).

После упрочнения ВМП под канавкой сформировались пластически деформированные слои металла шва шириной 1,35 мм и металла ЗТВ шириной 1,45 мм. При этом их глубина, характеризующаяся видимыми изменениями структуры металла под канавкой, до помещения в камеру КСТ-1 составляла 325 мкм [11]. После выдержки образцов стыковых сварных соединений в камере КСТ-1 упрочненного ВМП слоя металла не наблюдается (рис. 3, в, г), что свидетельствует о полном разрушении (коррозионно-механическом уносе) упрочненного слоя. В упрочненных ВМП сварных соединениях по сравнению с неупрочненными после выдержки в КСТ-1 глубина коррозионных повреждений (пятен и каверн) в металле шва снизилась до 0,039...0,195 мм, а в металле



Рис. 2. Внешний вид зоны шва упрочненного технологией ВМП образца стыкового сварного соединения после выдержки в камере КСТ-1 на протяжении 1200 ч до (а) и после (б) частичного удаления продуктов коррозии

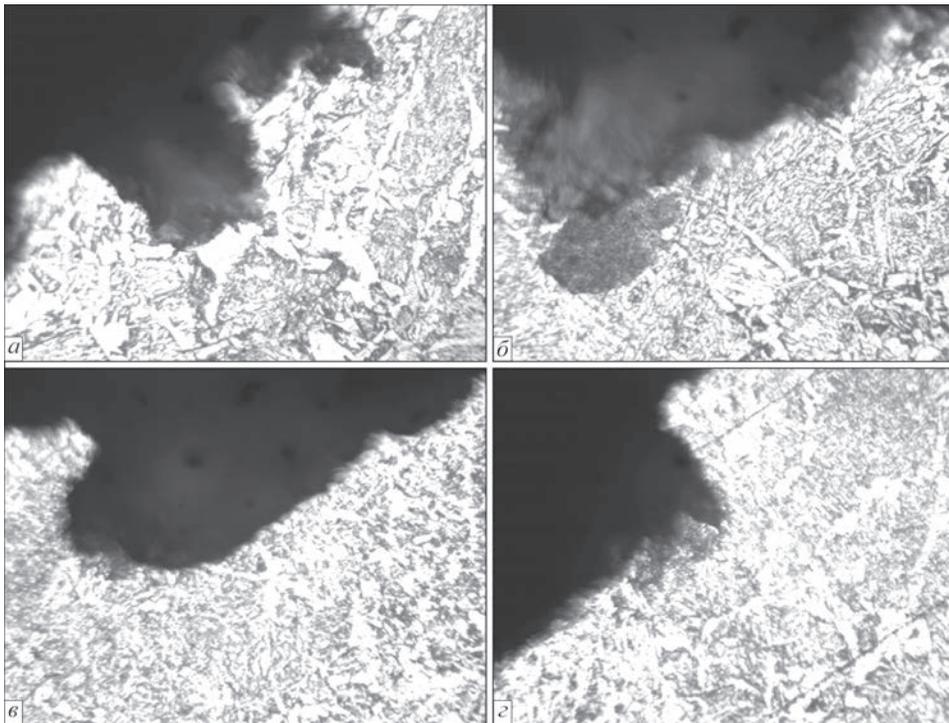


Рис. 3. Коррозионные повреждения в зоне сплавления стыкового сварного соединения в исходном (а, б) и упрочненном ВМП (в, г) состояниях после испытаний в условиях влияния нейтрального соляного тумана на протяжении 1200 ч,  $\times 400$

ЗТВ увеличилась до 0,390...0,620 мм (таблица). Степень поражения коррозионными повреждениями металла шва и ЗТВ составила 19,9 и 100 %, соответственно. Таким образом, упрочнение технологией ВМП не приводит к повышению коррозионной стойкости металла зоны проковки образцов стыковых сварных соединений в условиях длительного влияния нейтрального соляного тумана.

Результаты усталостных испытаний образцов стыкового сварного соединения стали 15ХСНД после выдержки в камере соляного тумана КСТ-1 представлены на рис. 4. Там же приведены экспериментальные данные, полученные в работе [11] на идентичных сварных соединениях без предварительных коррозионных испытаний (полученные на воздухе). Выдержка образцов стыковых сварных соединений в камере соляного тумана на протяжении 1200 ч приводит к снижению предела ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов неупрочненных сварных соединений на 13 % (с 187 до 163 МПа), а циклическая долговечность в диапазоне  $7 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$  циклов уменьшается до

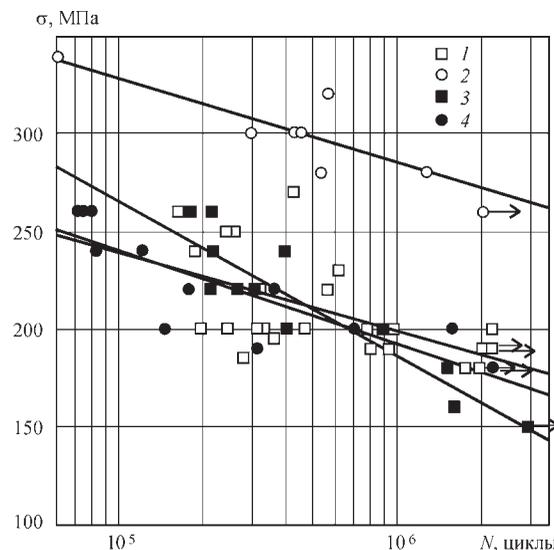


Рис. 4. Кривые усталости стыковых сварных соединений стали 15ХСНД: 1, 2 — в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях на воздухе [11], соответственно; 3, 4 — в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях после выдержки в камере КСТ-1 на протяжении 1200 ч, соответственно

**Размеры коррозионных повреждений в поверхностных слоях металла швов и зон термического влияния стыковых сварных соединений стали 15ХСНД после выдержки 1200 ч в камере соляного тумана**

Состояние образцов	Коррозия пятнами поверхностных слоев металла шва			Коррозия пятнами поверхностных слоев металла ЗТВ		
	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Сумма проекции площади поражения, мм	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Сумма проекции площади поражения, мм
Без упрочнения	53,7	0,104...0,390	25,8	100	0,104...0,390	7,15
Упрочненные ВМП	19,9	0,039...0,195	9,56	100	0,390...0,620	6,38



Рис. 5. Общий вид упрочненных технологией ВМП образцов стыкового сварного соединения после выдержки в камере КСТ-1 на протяжении 1200 ч и испытаний на усталость

2 раз (кривые 1 и 3, рис. 4). После КСТ-1 существенно снизились характеристики сопротивления усталости и упрочненных технологией ВМП сварных соединений: предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов снизился на 35 % (с 273 до 178 МПа), а циклическая долговечность уменьшилась до 30 раз (кривые 2 и 4, рис. 4). Таким образом, применение технологии ВМП позволило повысить предел ограниченной выносливости стыковых сварных соединений при последующем влиянии нейтрального соляного тумана лишь на 9 % (со 163 до 178 МПа), при этом их циклическая долговечность находится на уровне циклической долговечности сварных соединений в исходном состоянии (на воздухе).

Полученные значения характеристик сопротивления усталости упрочненных технологией ВМП соединений подтверждают, что предварительная выдержка соединений на протяжении 1200 ч в условиях нейтрального соляного тумана (имитация влияния климатических факторов внешней среды, характерных умеренно холодному морскому климату) привела к полному коррозионно-механическому уносу пластически деформированного слоя металла в зоне проковки. Разрушение как неупрочненных, так и упрочненных ВМП сварных соединений после выдержки в камере КСТ-1 происходило по линии перехода металла шва в металл ЗТВ (рис. 5). Фрактографический анализ изломов выявил значительные коррозионные повреждения металла ЗТВ в зоне проковки в виде каверн и каверн с питтингами внутри (рис. 6). Зарождение и развитие трещин в металле ЗТВ подтверждает данные металлографических исследований (таблица) о том, что металл ЗТВ упрочненных сварных соединений имеет более низкую коррозионную стойкость в сравнении с основным металлом и металлом шва.

Таким образом, экспериментально полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае длительного воздействия климатических факторов внешней среды, характерных умеренно холодному морскому климату, происходит полное разрушение поверхностного пластически деформированного ВМП слоя металла, а соответственно

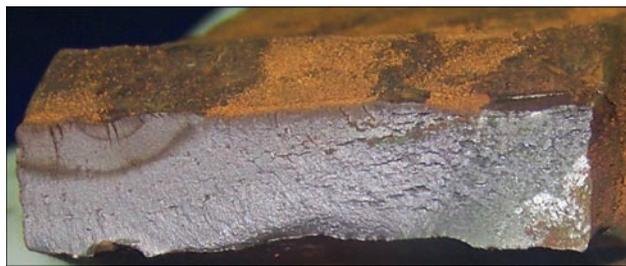


Рис. 6. Общий вид поверхности излома упрочненного технологией ВМП образца стыкового сварного соединения после выдержки в камере КСТ-1 на протяжении 1200 ч и испытаний на усталость

и снижение значений характеристик сопротивления усталости упрочненных сварных соединений до значений, характерных неупрочненным соединениям. Этому может способствовать несвоевременное проведение работ по поддержанию и восстановлению защитных покрытий (например, лакокрасочных) сварных соединений металлоконструкций, упрочненных технологией ВМП.

### Выводы

1. Проведены металлографические исследования поверхностных слоев металла шва и ЗТВ стыковых сварных соединений стали 15ХСНД в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях после коррозионных испытаний в камере соляного тумана КСТ-1 на протяжении 1200 ч. На основе вычислений степени и глубины, а также суммарного размера проекции площади поражений коррозионными пятнами и кавернами поверхностных слоев металла шва и ЗТВ соединений, установлено, что упрочнение технологией ВМП не приводит к повышению стойкости соединений к воздействию нейтрального соляного тумана.

2. Экспериментально установлено, что упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений стали 15ХСНД перед выдержкой в камере нейтрального соляного тумана на протяжении 1200 ч не способствует повышению их характеристик сопротивления усталости. Это вызвано тем, что предварительная выдержка соединений на протяжении 1200 ч в условиях воздействия нейтрального соляного тумана (моделирование влияния климатических факторов внешней среды, характерных умеренно холодному морскому климату) приводит к полному коррозионно-механическому уносу пластически деформированного ВМП слоя металла в зоне проковки.

### Список литературы/References

1. Madox S. J., Dore M. J., Smith S. D. (2011) A case study of the use of ultrasonic peening for upgrading a welded steel structure. *Welding in the World*, 55, 9, 56–67.
2. Abdullah A., Malaki M., Eskandari A. (2012) Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. *Materials & Design*, 8, 7–18.

3. Lefebvre F., Peyrac C., Elbel G. et al. (2017) HFMI: understanding the mechanisms for fatigue life improvement and repair of welded structures. *Welding in the World*, 61, 4, 789–799.
4. He B., Deng H., Jiang M. et al. (2017) Effect of ultrasonic impact treatment on the ultra high cycle fatigue properties of SMA490BW steel welded joints. *The International journal of advanced manufacturing technology*.
5. Malaki M., Ding H. (2015) A review of ultrasonic peening treatment. *Materials and Design*, 8, 1072–1086.
6. Mikkola E., Remes H., Marquis G. (2017) A finite element study on residual stress stability and fatigue damage in high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joint. *International journal of fatigue*, 9, 16–29.
7. Schubnell J., Hardenacke V., Farajian M. (2017) Strain-based critical plane approach to predict the fatigue life of high frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints depending on the materials condition. *Welding in the World*, 61, 6, 1199–1210.
8. Fohrenbach J., Hardenacke V., Farajian M. (2016) High frequency mechanical impact treatment (HFMI) for the fatigue improvement: numerical and experimental investigations to describe the condition in the surface layer. *Ibid*, 60, 4, 749–755.
9. Fan Y., Zhao X., Liu Y. (2016) Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*, 9, P. 515–522.
10. Кныш В. В., Соловей С. А., Ныркова Л. И. и др. (2016) Влияние коррозионных повреждений на циклическую долговечность тавровых сварных соединений, обработанных высокочастотной механической проковкой. *Автоматическая сварка*, 9, 46–51.  
Knysh, V.V., Solovej, S.A., Nyrkova, L.I. et al. (2016) Influence of corrosion damage on cyclic fatigue life of tee welded joints treated by high-frequency mechanical peening. *The Paton Welding J.*, 9, 42-46.
11. Кныш В. В., Соловей С. А., Кирьян В. И. и др. (2017) Применение высокочастотной проковки для повышения эксплуатационных характеристик стыковых сварных соединений в условиях атмосферы умеренного климата. *Там же*, 4, 15–20.  
Knysh, V.V., Solovej, S.A., Kirian, V.I. et al. (2017) Application of high-frequency peening to improve the performance of butt welded joints in the atmosphere of temperate climate. *Ibid.*, 4, 14-18.

В. В. Книш, С. О. Соловей, Л. И. Ныркова, В. М. Мірянін

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

**ВПЛИВ КОРОЗИЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА ЦИКЛІЧНУ  
ДОВГОВІЧНІСТЬ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ,  
ЗМІЦНЕНИХ ВИСОКОЧАСТОТНИМ МЕХАНІЧНИМ  
ПРОКОВУВАННЯМ**

В статті наведено результати ефективності застосування технології високочастотної механічної проковки з метою підвищення характеристик опору втомі стыкових зварних з'єднань сталі 15ХСНД при подальшому тривалому впливі кліматичних факторів зовнішнього середовища, характерних помірно холодному морському клімату. Вплив цього клімату моделю-

вали витримкою з'єднань у камері соляного туману КСТ-1 при температурі  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  і розпилюванні розчину хлориду натрію 15 хв через кожні 45 хв. Тривалість корозійних випробовувань зразків у камері КСТ-1 складала 1200 год. Після витримки у камері КСТ-1 були проведені металографічні дослідження поверхневого шару металу шва і металу зони термічного впливу зварних з'єднань у вихідному (незмцненому) і зміцненому даною технологією станах. Обчислені глибина і ступінь ураження корозійними плямами та кавернами поверхневих шарів металу швів і зони термічного впливу зварних з'єднань. Експериментально встановлені характеристики опору втомі зварних з'єднань у вихідному (незмцненому) і зміцненому високочастотною механічною проковкою станах після впливу нейтрального соляного туману протягом 1200 год. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* стикове зварне з'єднання, нейтральний соляний туман, втомі, високочастотна механічна проковка, підвищення опору корозійній втомі

V.V. Knysh, S.A. Solovej, L.I. Nyrkova, V.N. Miryanin

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

**INFLUENCE OF CORROSION DAMAGES ON CYCLIC  
LIFE OF BUTT WELDED JOINTS STRENGTHENED  
BY HIGH-FREQUENCY MECHANICAL PEENING**

In the article, the results of investigation of efficiency of applying the technology of high-frequency mechanical peening for increasing the fatigue resistance characteristics of butt welded joints of steel 15KhSND with a subsequent long-term exposure to climatic factors of the external environment, characteristic of a moderate cold marine climate, are given. The effect of given climate was modeled by holding the joints in the salt fog chamber KST-1 at the temperature of  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  and during spraying the sodium chloride solution for 15 minutes every 45 minutes. The duration of corrosion tests of specimens in the chamber KST-1 was 1200 h. After holding in the chamber KST-1, the metallographic examinations of the surface layer of the weld metal and the metal of heat-affected zone of welded joints in the initial (non-strengthened) state and in the state strengthened by this technology were carried out. The depth and degree of damage by corrosion spots and cavities of surface layers of weld metal and heat-affected zones of welded joints were calculated. The fatigue resistance characteristics of welded joints in the initial (non-strengthened) state and in the state strengthened by high-frequency mechanical peening were experimentally established after exposure to a neutral salt fog for 1200 h. 11 Ref., 1 Tab., 6 Fig.

*Keywords:* butt welded joint, neutral salt fog, fatigue, high-frequency mechanical peening, increase in resistance to corrosion fatigue

Поступила в редакцію 24.11.2017

# ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ АЛМАЗНОГО СЛОЯ С ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ПОДЛОЖКОЙ ПАЯНЫХ РЕЗЦОВ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ РЕСУРС

Б. В. СТЕФАНИВ, О. М. САБАДАШ

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

Ресурс эксплуатации буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами определяется величиной проходки в условиях абразивного, эрозионного, коррозионного изнашивания при бурении дегазационных скважин. В работе проведена оценка износа и микроструктуры соединения алмазного слоя с твердосплавной подложкой цельного резца «Syndrill» фирмы «Element Six» (Ирландия) и составного резца (ИСМ НАНУ) буровых долот после отработки их ресурса. Показано, что в цельных резцах кобальт равномерно распределен в алмазном слое и его количество составляет до 2,06 мас. % в отличие от составных, где количество кобальта — 4,35 мас. %. Увеличение содержания кобальта и уменьшение объемного содержания алмазных зерен в алмазном слое составных резцов снижают их термостойкость и износостойкость. Пористость составных алмазно-твердосплавных резцов больше в 2 раза по сравнению с цельными резцами «Syndrill», что способствует проникновению большего количества элементов припоя (меди и цинка) в переходную зону соединения твердосплавной подложки и алмазного слоя. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 6.

*Ключевые слова:* долото, алмазный слой, алмазно-твердосплавный резец, алмазно-твердосплавная пластина, твердосплавная подложка, спеченный материал, пайка, припой, микроструктура, пористость, износ

Ресурс рабочих органов буровых долот, оснащенных цельными и составными алмазно-твердосплавными резцами, зависит, в основном, от физико-химических свойств алмазного слоя и адгезии его к твердосплавной подложке после воздействия на него термического цикла пайки, а также прочностных и коррозионных свойств паяного соединения «АТР-лопасть рабочего органа долота» [1–4].

Высокая скорость износа вызвана различиями в скорости теплового расширения между алмазными частицами и кобальтом, а также высокой температуры, которая оказывает влияние на кинетику химических реакций между кобальтом и алмазными частицами и процесса графитизации алмазного слоя. Значительное различие в коэффициентах теплового расширения алмазных частиц  $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  и кобальта  $12,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  обуславливает высокие уровни термомеханических напряжений в переходной зоне соединения АТР.

Графитизация алмазного слоя резцов «Syndrill» фирмы «Element-6» (Ирландия) существенно ускоряется при температурах выше  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для резца алмазно-твердосплавной пластины (АТП) ИСМ НАНУ выше  $680 \text{ }^\circ\text{C}$  [2], что приводит к деградации режущей кромки и увеличению износа резцов, ухудшению эффективности породоразрушающего инструмента и уменьшению величины проходки (рис. 1).

Цель работы — исследование влияния микроструктуры соединения алмазного слоя с твердос-

плавной подложкой АТР буровых долот на их эксплуатационный ресурс.

Испытания буровых долот проводили при бурении дегазационных скважин на 12-м западном вентиляционном штреке пласта  $L_1$  в Донбассе. Для бурения скважин использовали электрогидравлическую установку глубинного бурения типа GBH 1/89/12 фирмы «Дайльман-Ханиэль» (Германия) при углах бурения к горизонту от  $8$  до  $60^\circ$ . Режим бурения: номинальная частота вращения шпинделя установки  $70 \dots 100 \text{ мин}^{-1}$ ; усилие подачи бурового инструмента  $50 \dots 100 \text{ кН}$ . Бурение дегазационных скважин длиной до  $150 \text{ м}$  проводили по вмещающим горным породам, представленными алевролитами и абразивными песчаниками с пределом прочности одноосному сжатию до  $120 \text{ МПа}$ . Для промывки скважин и охлаждения бурового инструмента расход технической воды составлял до  $50 \text{ л/мин}$ .

Цельные и составные АТР были запаяны в гнезда лопасти буровых долот с помощью серебряного припоя ВAg-1а в температурном интервале  $650 \dots 680 \text{ }^\circ\text{C}$ . После отработки определенного эксплуатационного ресурса рабочих органов стальных долот (рис. 1), резцы были выпаяны из гнезд лопасти. Общее время выдержки  $\tau$  при температуре пайки АТР составляло  $\tau = 90 \dots 120 \text{ с}$ .

Исследование микроструктуры соединения твердосплавной подложки с алмазным слоем проводили на металлографических шлифах (поперечный разрез, износ режущей кромки составлял



Рис. 1. Внешний вид изношенных резцов лопасти стального бурового долота (×3): а — АТФ «Syndrill» после проходки 1000 м; б — составной резец АТФ ИСМ НАНУ после проходки 250 м

около 2 мм) с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 XV.P (Karl Zeiss, Германия), оснащенного энергодисперсионным анализатором INCA-energy 450 (Oxford Instruments, Англия).

Распределение основных элементов (рис. 2) в характеристическом излучении вольфрама, кобальта, углерода указывает на присутствие углерода в алмазосодержащем слое (справа) и на участке, граничащем с твердосплавной подложкой (слева) цельного АТФ «Syndrill» фирмы «Element Six» (Ирландия). Вольфрам и кобальт находятся в твердосплавной подложке и переходной зоне с алмазным слоем.

Соединение цельного резца (АТФ) условно состоит из трех характерных участков: твердосплавной подложки А, переходной зоны В, С, D, алмазного слоя Е, которые отличаются неоднородной микроструктурой (рис. 3) и различным химическим составом (табл. 1).

Таблица 1. Содержание элементов (мас. %) в исследуемых участках АТФ «Syndrill»

Участки	C	Co	W	Ni	Cu	Zn
А	29,42	3,92	65,03	1,63	-	-
В	42,27	2,82	41,02	1,20	3,63	2,18
С	41,15	2,83	48,98	1,45	5,59	-
Д	89,20	1,55	4,07	-	2,18	3,00
Е	94,96	2,06	2,31	0,67	-	-

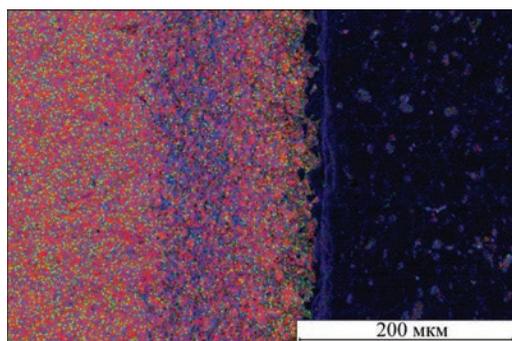


Рис. 2. Распределение элементов в характеристическом излучении АТФ «Syndrill»: углерод — синий, вольфрам — красный, кобальт — зеленый

Твердосплавная подложка А состоит из мелкодисперсных частиц карбида вольфрама (светло-серые), связанных сплавом на основе кобальта (серые), содержащего до 1,63 мас. % никеля, микроструктура которой присуща твердосплавному спеченному материалу системы WC-Co. Никель используется в качестве катализатора [5] при спекании мелкодисперсных порошков.

Твердый спеченный материал системы WC-Co (участок В, шириной около 10 мкм) с меньшим количеством кобальта (2,82 мас. %), дополнительно содержит отдельную фазу из сплава меди с цинком с соотношением этих элементов 1,7/1. Участок С шириной около 120 мкм (рис. 6, а) имеет более измельченную микроструктуру карбидов вольфрама, матрица состоит из спеченного материала системы WC-Co и дополнительно содержит, мас. %: 1,45 Ni и 5,59 Cu. Переходная зона (участок D шириной около 10 мкм) имеет неоднородную структуру спеченного материала систем WC-Co (светлые) и C-Co (темные), который содержит включения из сплава меди с цинком с соотношением этих элементов 0,73/1. Алмазный слой (участок Е) состоит из зерен поликристаллических алмазов, связанных сплавом на основе кобальта, и содержит, мас. %: 94,96 C; 2,06 Co (темный); 2,31 W и 0,67 Ni.

Распределение основных элементов (рис. 4) в характеристическом излучении вольфрама, ко-

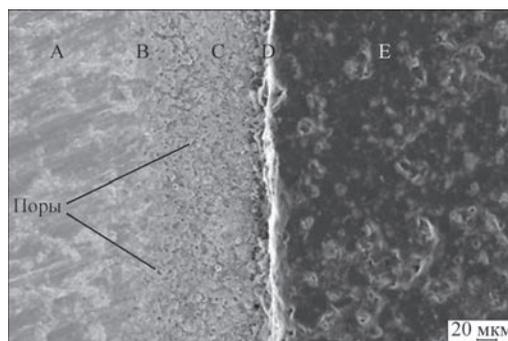


Рис. 3. Микроструктура АТФ «Syndrill»: А — твердосплавная подложка, (В, С, D) — переходная зона, Е — алмазосодержащий слой

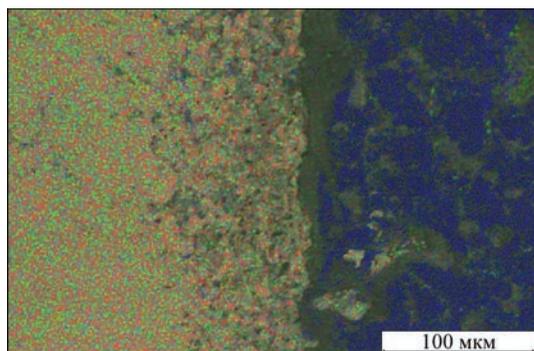


Рис. 4. Распределение элементов в характеристическом излучении АТП (ИСМ НАНУ): углерод — синий, вольфрам — красный, кобальт — зеленый

бальта, углерода составного резца АТП (ИСМ НАНУ) указывает на присутствие углерода в алмазном слое (справа) и меньшей интенсивности спектра на участке, граничащем с твердосплавной подложкой (слева). Вольфрам и кобальт распределены в твердосплавной подложке. На участке переходной зоны с алмазным слоем обнаружено локальное распределение кобальта (зеленый спектр).

Соединение составного резца, по аналогии с предыдущим АТР, состоит из трех характерных участков, отличающихся неоднородной микроструктурой (рис. 5) и различным химическим составом (табл. 2).

Твердосплавная подложка F включает более крупные частицы карбида вольфрама (светло-серые) в кобальтовой матрице (серые). Она по структуре подобна промышленному спеченному материалу, а по химическому составу близка к сплаву ВК12. Кобальтовая матрица G спеченного материала системы WC-Co шириной около 10 мкм, с относительно меньшим количеством кобальта 9,16 мас. %, дополнительно содержит отдельную фазу в виде сплава меди с цинком. Участок H шириной около 90 мкм (рис. 6, б) переходной зоны характеризуется крупными зёрнами карбидов спеченного материала системы WC-Co и дополнительно содержит отдельную фазу меди и цинка в соотношении этих элементов 2,3/1. Участок I шириной около 10 мкм имеет неоднородную микроструктуру, присущую спеченному материалу из порошков карбида вольфрама и алмаза систем WC-Co (светлые) и C (алмаз) — Co (темные), а также содержит включения фазы из сплава меди с цинком в соотно-

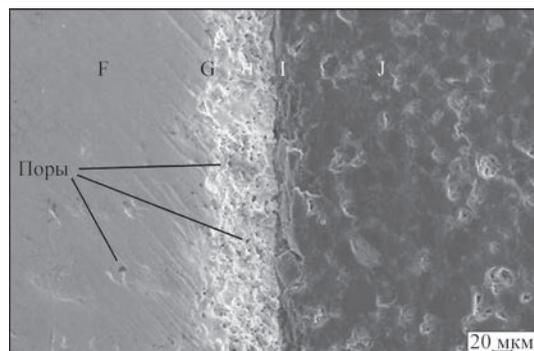


Рис. 5. Микроструктура составного резца АТП (ИСМ НАНУ): F — твердосплавная подложка, (G, H, I) — переходная зона, J — алмазный слой

шении 1,6/1. В алмазном слое J содержится, мас. %: 89,92 C; 4,32 Co; 5,73 W.

По результатам исследований установлено, что содержание углерода закономерно изменяется при переходе от твердосплавной подложки к алмазному слою на отдельных участках, мас. %: 29,42 (A), 42,27 (B) и 41,15 (C) и резко возрастает от 89,2 (D) до 94,96 (E). Количество кобальта (см. табл. 1) соединения АТР на участках составляет, мас. %: 3,92 (A) и 2,83 (C), а в алмазном слое 2,06 (E). Содержание вольфрама, наоборот, уменьшается от участка A до участка E, а в алмазном слое его содержание составляет всего несколько процентов. Закономерность изменения содержания углерода и кобальта подтверждает сложную структуру композиционного материала АТР, состоящего из спеченных мелкодисперсных порошков систем: WC-Co (твердосплавная подложка), WC-C-Co (переходная зона), C-Co (алмазный слой).

Химический состав составного АТР также закономерно изменяется на отдельных участках, мас. %: углерод — 10,48 (F), затем повышается до 19,07(G) и уменьшаются до 10,46 (H), а при переходе границы повышается до 67,48 (I) и возрастает в алмазном слое до 89,92(J). Количество кобальта (см. табл. 2) на участках соединения составного АТР соответственно составляет, мас. %: подложка — 12,22 (F), переходная зона — 9,16 (G), — 5,36(H), — 7,96(I), а в алмазном слое — 4,35 (E).

На исследуемых участках переходной зоны твердосплавной подложки и алмазного слоя цель-

Таблица 2. Содержание элементов (мас. %) в исследуемых участках АТП (ИСМ НАНУ)

Участки	C	Co	W	Cu	Zn
F	10,48	12,22	77,30	-	-
G	19,07	9,16	65,22	4,11	2,44
H	10,46	5,36	52,99	21,8	9,39
I	67,48	7,96	13,75	6,76	4,05
J	89,92	4,35	5,73	-	-



Рис. 6. Микроструктура АТП с маркером ширины переходной зоны, мкм: а — «Syndrill», 140,6; б — АТП (ИСМ НАНУ), 90,82

ного и составного АТР присутствуют элементы из припоя: медь и цинк. Ширина переходной зоны твердосплавной подложки с алмазным слоем цельного АТР (рис. 6, а) примерно в 1,55 раза больше составного АТР (рис. 6, б).

Известно [6], что пористость составного отечественного резца АТП составляет 2...5 %. Можно предположить, что в процессах изготовления составного АТП [2] и креплении его [3] в отверстия лопастей происходят диффузионные процессы при пайке, когда элементы из припоя, в данном случае медь и цинк, проникают через поры в переходную зону. В работе [1] установлено, что при использовании серебряных припоев в технологических процессах пайки спеченных материалов системы WC-Co на приграничных участках с твердосплавной подложкой преимущественно формируется переходный слой из твердого раствора на основе меди с цинком. Пористость отечественных АТП примерно в 2 раза больше по сравнению с АТР фирмы «Element Six» (Ирландия), что способствует увеличению количества меди и цинка, которые формируют твердые растворы на основе меди с цинком переменного состава, на приграничных участках переходной зоны с твердосплавной подложкой и алмазным слоем.

В переходной зоне АТР «Syndrill» на исследуемых участках В, С, D присутствуют малого размера зерна WC и малое количество кобальта, которые увеличивают твердость и сопротивление износу за счет прочности. В составном АТР участки G, H, I переходной зоны присутствуют крупные зерна WC, высокое содержание кобальта снижает твердость и сопротивление износу, но повышает ударную вязкость спеченного сплава. В работе [7] показано, что более крупные зерна карбидов вольфрама (WC) способствуют увеличению пористости твердых сплавов.

Согласно результатам исследования соединения алмазного слоя и подложки в образцах, изготовленных фирмой «Element Six» (Ирландия) и АТП (ИСМ НАНУ), можно констатировать, что алмазный слой АТР «Syndrill» менее подвержен воздействию термического цикла пайки и имеет существенно больший ресурс и, соответственно, величину проходки бурового долота. Высокое объемное содержание алмазных зерен и строго ограниченное количество связующего порошка кобальта в поликристаллическом слое АТР повышает его прочностные свойства, термостойкость и сопротивление износу. Переходная зона АТР «Syndrill» имеет относительно большие размеры, мелкозернистую структуру карбидов вольфрама (WC) и низкое содержание кобальта, а также более низкую пористость по сравнению с АТП (ИСМ НАНУ), что способствует увеличению

твердости и релаксации остаточных напряжений в условиях переменного нагружения.

В настоящее время менее пористые спеченные материалы системы WC-Co изготавливают путем введения тонких частиц карбида вольфрама в кобальтовую матрицу и методом высокотемпературного синтеза в вакууме или в водородной атмосфере. Изменением содержания кобальта и размера тонкодисперсных частиц получают десятки стандартных классов твердых спеченных сплавов. Эти композиционные материалы сочетают твердость при ограниченной деформации с прочностью и сопротивлением к образованию трещин.

### Выводы

1. Буровые долота, оснащенные цельными резцами, имеют больший (в 4 раза) эксплуатационный ресурс по сравнению с составными резцами, за счет высокого объемного содержания алмазных зерен и ограниченного количества связующего кобальта в поликристаллическом слое.
2. Компоненты припоя медь и цинк присутствуют на участках переходной зоны, граничащих с твердосплавной подложкой и алмазным слоем. Более высокая пористость составного АТР способствует увеличению количества сплава системы Cu-Zn.

### Список литературы

1. Хорунов В. Ф., Стефанив Б. В., Сабадаш О. М. и др. (2012) Особенности технологий ремонта буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами. *Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, споруд та машин. Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр.* – Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, сс. 488–493.
2. Стефанив Б. В. (2013) Разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов. *Автоматическая сварка*, 2, 38–42.
3. Стефанив Б. В. (2013) Особенности индукционной пайки алмазно-твердосплавных резцов с лопастью корпуса составного бурового долота. *Там же*, 8, 50–54.
4. Стефанив Б. В., Хорунов В. Ф., Сабадаш О. М. и др. (2015) Особенности технологии ремонта изношенных рабочих органов стальных и матричных корпусов буровых долот. *Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, споруд та машин: Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр.* – Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, сс. 688–696.
5. Чинтаманени Вамсее, Беллин Федерико (2013) *Высокотемпературная обработка при высокой скорости нагрева резцов рdc*. РФ, Пат. 2628593, МПК C21D 9/22, E21B 10/567.
6. Гончаренко И. М. *Физические основы разработки и производства твердых сплавов*. <http://portal.tpu.ru>
7. Besson Alain, Burr Bruce, Dillard Scott et al. (2000) On the Cutting Edge. *Oilfield Review*, 12, 3, 36–57.

### References

1. Khorunov, V.F., Stefaniv, B.V., Sabadash, O.M. et al. (2012) Peculiarities of restoration technologies of drill bits with diamond-hard-alloy cutters. In: *Problems of life and safety of service of structures, constructions and machines*: Transact. of 2010-2012 results. Kyiv, PWI, pp. 488-493 [in Russian].
2. Stefaniv, B.V. (2013) Development of the technology of brazing diamond-hard-alloy cutters. *The Paton Welding J.*, 2, 37-41.

3. Stefaniv, B.V. (2013) Peculiarities of induction brazing of diamond-hard- alloy cutters to blade of body of complex drill. *Ibid.*, **8**, 49-53.
4. Stefaniv, B.V., Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. et al. (2015) Peculiarities of restoration of working parts of drilling bits of steel and matrix bodies. *In: Problems of life and safety of service of structures, constructions and machines*: Transact. of 2013-2015 results. Kyiv, PWI, pp. 688-696 [in Russian].
5. Chintamaneni, V., Bellin, F. (2013) *High-temperature treatment at high heating rate of pdc cutters*. Pat. 2628593, RU, Int. Cl. C21D 9/22, E21B 10/567 [in Russian].
6. Goncharenko, I.M. Physical basics of development and manufacture of hard alloys. <http://portal.tru.ru>
7. Besson, A., Burr, B., Dillard, S. et al. (2000) On the cutting edge. *Oilfield Review*, 12(3), 36-57.

Б. В. Стефанів, О. М. Сабадаш

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

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ЗОНИ З'ЄДНАННЯ  
АЛМАЗНОГО ШАРУ З ТВЕРДОСПЛАВНОЮ  
ПІДКЛАДКОЮ ПАЯНИХ РІЗЦІВ  
НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РЕСУРС

Ресурс експлуатації бурових доліт з алмазно-твердосплавними різцями визначається величиною проходки в умовах абразивного, ерозійного, корозійного зношування при бурінні дегазаційних свердловин. У роботі проведена оцінка зносу та мікроструктури з'єднання алмазного шару з твердосплавною підкладкою цільного різця «Syndrill» фірми «Element Six» (Ірландія) і складеного різця (ІСМ НАНУ) бурових доліт після відпрацювання їх ресурсу. Показано, що в цільних АТР кобальт рівномірно розподілений в алмазному шарі і його кількість складає до 2,06 мас. % на відміну від різців, де кількість кобальту — 4,35 мас. %. Збільшення вмісту кобальту і зменшення об'ємного змісту алмазних зерен в алмазному шарі різців знижують їх термостійкість і зносостійкість. Пористість складених алмазно-твердосплавних різців більше в 2 рази в порівнянні з цільними різцями «Syndrill», що спри-

яє проникненню більшої кількості елементів припою (міді і цинку) в перехідну зону з'єднання твердосплавних підкладки і алмазного шару. *Бібліогр.* 7, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* долото, алмазний шар, алмазно-твердосплавний різець, алмазно-твердосплавна пластина, твердосплавна підкладка, спечений матеріал, пайка, припій, мікроструктура, пористість, знос

B.V. Stefaniv, O.M. Sabadash

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

EFFECT OF STRUCTURE OF JOINT ZONE  
OF DIAMOND LAYER WITH HARD-ALLOY SUBSTRATE  
OF BRAZED CUTTERS ON THEIR SERVICE LIFE

Service life of drilling bits with diamond-hard-alloy cutters is determined by value of drifting under conditions of abrasive, erosion and corrosion wear in drilling of degassing holes. The work carried evaluation of wear and microstructure of joining of diamond layer with hard-alloy substrate of «Syndrill» integral cutter of «Element Six» company (Ireland) and composite cutter (ISM of NASU) of drilling bits after completion of their life. It is shown that cobalt in the integral cutter is uniformly distributed in the diamond layer and its amount makes up to 2.06% wt% in contrast to combined ones, where amount of cobalt is 4.35 wt%. Increase of cobalt content and decrease of volume content of the diamond grains in diamond layer of the composite cutters reduce their heat resistance and wear resistance. Porosity of composite diamond-hard-alloy cutters is 2 times more in comparison with integral «Syndrill» cutters that promote penetration of larger amount of brazing alloy elements (cooper and zinc) in a transition zone of joint of hard-alloy substrate and diamond layer. *Ref.* 7, *Tabl.* 2, *Fig.* 6.

*Keywords:* drilling bit, diamond layer, diamond-hard-alloy cutter, diamond-hard-alloy plate, hard-alloy substrate, sintered material, brazing, brazing alloy, microstructure, porosity, wear

Поступила в редакцію 29.11.2017



## МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

### VIII спеціалізована виставка «Метал. Обладнання. Інструмент 2018»

25–27 квітня 2018 р., Палац спорту «Україна», вул. Мельника, 18, м. Львів

#### Тематичні розділи виставки:

- ◆ обладнання для обробки металу ◆ металорізальні верстати та оснастка
- ◆ лазерне, плазмове обладнання і технології ◆ обладнання для розкрою листа і прокату
- ◆ металорізальні інструменти ◆ зварювальне обладнання ◆ ковальське обладнання та ін.

Детальна інформація про проект та архів заходів на сайті: <http://met.expolviv.ua>

## ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА И НАПЛАВКА ПРИ РЕМОНТЕ РЕЛЬСОВ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Г. В. КУЗЬМЕНКО<sup>1</sup>, В. М. ТАГАНОВСКИЙ<sup>1</sup>, В. Л. СИДОРЕНКО<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>КП «Киевский метрополитен». 02093, г. Киев, ул. Бориспольская, 20-а. E-mail: C.Sidorenko@metro.kiev.ua

Эксплуатация линий метрополитена имеет свои особенности. Наиболее ответственным элементом пути являются рельсы, в которых особенно напряженное место — стыки. Уменьшение количества болтовых соединений стыков существенно снижает вероятность образования дефектов в рельсах. Приведен опыт Института электросварки по применению в киевском метрополитене нового способа соединения рельсов — автоматической электродуговой сварки ванным способом плавящимся мундштуком. Он обеспечивает большую производительность сварки по сравнению с алюмотермитной сваркой и требуемые механические свойства соединений. Восстановление поверхностей рельсов и деталей стрелочных переводов рекомендуется выполнять полуавтоматической дуговой наплавкой самозащитной порошковой проволокой. Библиогр. 4, табл. 1, рис. 3.

*Ключевые слова:* дуговая ванная сварка, дуговая наплавка, стыки рельсов, дефекты, восстановление поверхности рельсов

В современной транспортной инфраструктуре г. Киева метрополитен является наиболее надежным видом транспорта, способным перевозить максимальное количество пассажиров в единицу времени. На его долю приходится более 50 % общего объема городских пассажирских перевозок. Сегодня киевский метрополитен занимает 24-е место в мире по пассажиропотоку, при этом является всего лишь 49-м по длине линий. По состоянию на 2017 г. киевский метрополитен имеет три действующие линии, суммарная эксплуатационная длина которых 69,65 км, с 52 станциями, а среднесуточные перевозки пассажиров превышают 1,3 млн человек [1].

Киевский метрополитен представляет собой многопрофильное предприятие, современный сложный инженерный комплекс. В его составе действуют 11 эксплуатационных служб, 3 электродепо (ТЧ-1 «Дарница», ТЧ-2 «Оболонь» и ТЧ-3 «Харьковское»), вагоноремонтный завод (ВРЗ), дирекция строительства метрополитена.

Устройство пути, эксплуатационные условия его работы и особенности взаимодействия пути и подвижного состава на линиях метрополитена существенно отличаются от таких же на магистральном железнодорожном транспорте.

Железнодорожный путь в киевском метрополитене в основном размещен в туннелях при небольшой протяженности главных путей на поверхности (около 9 %). Длина перегонов между станциями составляет от 1,0 до 2,5...3,0 км, что гораздо меньше по сравнению с магистральными железными дорогами, где длина перегонов обычно составляет от 6,0 до 10...15 км и больше. Такая

плотность размещения станций обусловливается необходимостью создания пассажирских потоков в условиях плотной городской застройки.

Эксплуатационные условия на линиях метрополитена достаточно напряженные: при относительно небольших осевых нагрузках на рельсы (статическая нагрузка  $P_c = 150$  кН, динамическая  $P_d = 172$  кН) средняя грузонапряженность приближается и, в некоторых случаях, превышает среднюю грузонапряженность на магистральных железных дорогах (например, на киевском метрополитене средняя грузонапряженность достигает  $\Gamma_{cp} = 25,23$  млн ткм/км брутто в год, в то время как на магистральных линиях «Укрзалізниці» (УЗ) этот показатель составляет 17...17,8 млн ткм/км брутто в год, а на главных путях магистральных линий УЗ — 35...45 млн ткм/км брутто в год). При этом интенсивность движения поездов в метрополитене в часы «пик» достигает 40 пар поездов в час, а в среднем 352 пары поездов в сутки, которая значительно превышает этот показатель на путях магистральных железных дорог. Скорости движения поездов достигают 70...80 км/ч, что близко к скорости грузовых и пригородных поездов на магистральном транспорте.

Рельсы — основной и наиболее ответственный элемент верхнего строения пути. Назначение рельсов — направлять колеса подвижного состава, непосредственно воспринимать, распределять и передавать нагрузку от колес на подрельсовое основание.

Места соединения рельсов между собой называют стыками. По конструкции различают стыки температурные, изолирующие и сварные.

В температурных стыках между концами рельсов, соединенных накладками, оставляют зазоры для возможности изменения длины рельсов при изменении температуры. В результате разрыва цельности и изменения изгибной жесткости рельсовых нитей в болтовых стыках при проходе колес подвижного состава по ним возникает излом упругой линии рельсов и дополнительное ударно-динамическое воздействие колес на путь. Поэтому стык является наиболее напряженным местом пути. Около 35...50 % затрат труда по содержанию пути связано с наличием стыков. Кроме того, значительная часть всех дефектов рельсов, которые возникают в процессе их эксплуатации, развиваются именно в районе стыков. Следовательно, уменьшение количества болтовых соединений стыков путем замены их на сварные в итоге существенно снижает интенсивность образования дефектов в рельсах в процессе их эксплуатации.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины для замены болтовых стыков предложен новый способ сварки рельсов — автоматическая электродуговая сварка ванным способом плавящимся мундштуком [2]. Этот способ обеспечивает более высокие свойства сварных соединений, чем традиционные ручная дуговая и алюмотермитная сварка, и уже нашел применение при сварке трамвайных и подкрановых путей [3].

Так как поверхность рельсов в районе стыка подвергается большему износу, чем вся рабочая поверхность рельсов, которая значительно дольше сохраняет свои эксплуатационные характеристики, восстановительная наплавка отдельных участков элементов рельсового пути обходится дешевле, чем замена этих элементов новыми.

Ремонт рельсов является одним из наиболее экономически выгодных способов продления срока их службы. Он проводится в процессе эксплуатации без выемки их из колеи, а также с выемкой при разных работах, при этом первый вариант с экономической точки зрения является предпочтительным.

Самым популярным и универсальным способом ремонта и восстановления изношенных поверхностей рельсов и деталей стрелочных переводов является наплавка. Железными дорогами наплавка широко применяется как средство продления срока службы рельсов и других металлических элементов верхнего строения пути [4]. Для этих целей многие годы традиционно используется ручная электродуговая наплавка покрытыми электродами. Данный способ достаточно успешно применяется там, где объемы ремонтных работ относительно невелики, и в местах, где к зоне ремонта доступ затруднен. Там же, где объемы вну-

шительны, применяется полуавтоматическая электродуговая наплавка самозащитной порошковой проволокой.

Специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и службой пути, туннельных сооружений и строений КП «Киевский метрополитен» было предложено применить для ремонта рельсов метрополитена автоматическую электродуговую наплавку самозащитной порошковой проволокой, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с ручной электродуговой наплавкой штучными электродами и полуавтоматической наплавкой, а именно: высокая производительность труда, культура производства и качество наплавочных работ. Так как процесс является непрерывным, количество дефектов в наплавленном металле и околошовной зоне сводится к минимуму, значительно сокращается расход сварочных материалов, уменьшается время на механическую обработку восстановленного наплавкой участка и не требуется предварительного подогрева, что сокращает общее время ремонта.

На протяжении 2013–2015 гг. в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона совместно со службой пути, туннельных сооружений и строений КП «Киевский метрополитен» проведены исследования и опытные работы, целью которых было создание технологий ремонта дефектов рельсов наплавкой и ликвидации температурных болтовых стыков при помощи автоматической дуговой сварки в условиях действующих путей метрополитена. Было разработано и изготовлено опытное оборудование (рис. 1, 2), отличающееся высокой мобильностью, необходимой для выполнения оперативных ремонтных работ, в том числе в условиях туннелей.

На основании согласованных технических заданий была разработана необходимая техническая документация — Технологические регламенты



Рис. 1. Комплект опытного оборудования для автоматической дуговой наплавки рельсов порошковой проволокой



Рис. 2. Автоматическая электродуговая сварка рельсов ванным способом плавящимся мундштуком в туннеле киевского метрополитена

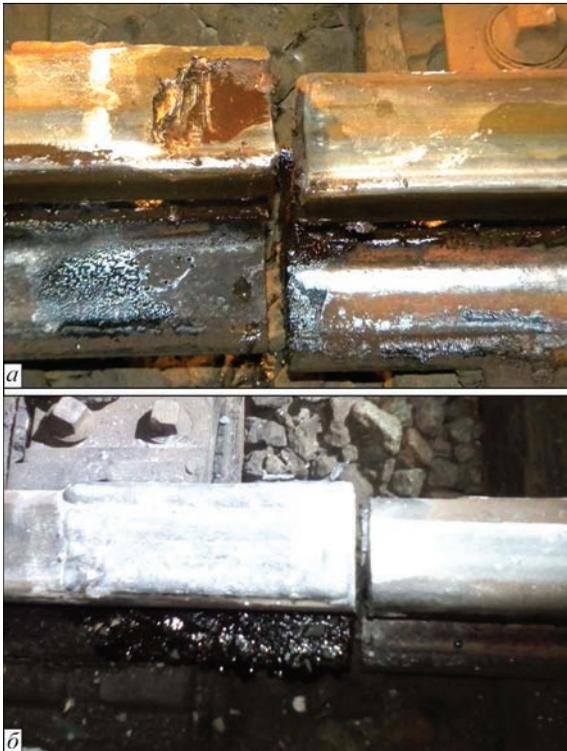


Рис. 3. Дефект рельса 17.1 (а) и внешний вид конца рельса после наплавки (б)

«Выполнение опытных работ по восстановлению элементов пути электродуговой наплавкой порошковой проволокой на путях метрополитена г. Киева» и «Выполнение опытных работ по ликвидации температурных стыков рельсов автоматической электродуговой сваркой ванным способом плавящимся мундштуком на путях метрополитена г. Киева». Также в лабораторных условиях были сварены контрольные образцы рельсов Р50 и Р65, предоставленные киевским метрополитеном, которые прошли испытания на трехточечный поперечный изгиб на киевском рельсосварочном предприятии службы пути Юго-Западной железной

**Результаты испытаний контрольных образцов сварных стыков рельсов на трехточечный поперечный изгиб**

Зона растяжения натуральных образцов на пролете 1 м	Разрушающая нагрузка для рельсов типа, кН		Стрела прогиба, мм
	50Р	Р65	
Подшва (нагружение на головку)		1650	24
Головка (нагружение на подшву)		1380	16
Подшва (нагружение на головку)	1160		22
Головка (нагружение на подшву)	860		15

дороги. Результаты испытаний (таблица) соответствовали требованиям Регламента.

В ноябре-декабре 2016 г. на подземных участках всех трех линий киевского метрополитена было сварено 5 стыков рельсов Р50 и 10 стыков рельсов Р65, а в 2017 г. на подземных и открытых участках выполнен ремонт 9 дефектов в виде выкрашиваний и отслоений металла в стыках (код дефекта 17.1 по ЦП/0061 «Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень рейок залізниць України»). Указанный тип дефекта (рис. 3) является одним из наиболее распространенных (около 16 % от общего количества дефектов рельсов на действующих путях киевского метрополитена).

В настоящее время сваренные стыки и отремонтированные рельсы находятся в опытной эксплуатации и проходят регулярный визуальный и ультразвуковой контроль. Результаты эксплуатации будут учтены при разработке документации, необходимой для дальнейшего промышленного внедрения указанных технологий при ремонте путей киевского метрополитена.

**Список литературы**

1. Київський метрополітен, офіційний сайт <http://www.metro.kiev.ua>
2. ТУ У 27.1-34867717-001:2012 Автоматичне дугове зварювання ванным способом плавким мундштуком стиків рейок.
3. Кузьменко В. Г., Кузьменко Г. В., Галинич В. И., Тагановский В. М. (2012) Новая технология электродуговой сварки ванным способом рельсов в условиях трамвайных и подкрановых путей. *Автоматическая сварка*, **5**, 40–44.
4. Крейнис З. Л., Коршикова Н. П. (2001) *Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути. Учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта*. Москва, УМК МПС России.

**References**

1. Kiev metro. <http://www.kiev.ua> [in Ukrainian].
2. TU U 27.1-34867717-001:2012: Automatic consumable electrode arc bath welding of rail joints [in Ukrainian].
3. Kuzmenko, V. G., Kuzmenko, G.V., Galinich, V.I. et al. (2012) New technology of electric arc bath welding of rails on tram and crane tracks. *The Paton Welding J.*, **5**, 33-36.
4. Krejnis, Z.L., Korshikova, N.P. (2001) *Maintenance and repair of railway: Manual*. Moscow, UMC MPS Russia. ISBN 5-89035-050-1 [in Russian].

Г. В. Кузьменко, В. М. Тагановський, В. Л. Сидоренко

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

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ І НАПЛАВКА  
ПІД ЧАС РЕМОНТУ РЕЙОК  
КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

Експлуатація ліній метрополітену має свої особливості. Найбільш відповідальним елементом шляху є рейки, в яких особливо напруженим місцем є стики. Зменшення кількості болтових з'єднань стиків істотно знижує ймовірність утворення дефектів у рейках. Наведено досвід Інституту електрозварювання по застосуванню в київському метрополітені нового способу з'єднання рейок — автоматичного зварювання ванним способом плавким мундштуком. Він забезпечує велику продуктивність зварювання в порівнянні з алюмотермічним зварюванням і необхідні механічні властивості з'єднань. Відновлення поверхонь рейок і деталей стрілкових переводів рекомендується виконувати напівавтоматичним дуговим наплавленням самозахисним порошковим дротом. Бібліогр. 4, табл. 1, рис. 3.

*Ключові слова:* дугове ванне зварювання, дугове наплавлення, стики рейок, дефекти, відновлення поверхні рейок

G.V. Kuzmenko<sup>1</sup>, V.M. Taganovskii, V.L. Sidorenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>CE «Kiev metro», 20-a Borispolskaya Str., 02093, Kiev.  
E-mail: C.Sidorenko@metro.keiv.ua

ELECTRIC ARC WELDING AND SURFACING  
IN REPAIR OF RAILS OF KIEV METRO

Operation of metro lines has own operation. The most critical element of track is rails, in which butts are particularly stressed place. Decrease of number of bolted butt joints significantly reduces the possibility of defect formation in rails. Experience of the E. O. Paton Electric Welding Institute on application in Kiev metro of a new method of rails joining, namely automatic consumable electrode electric arc bath welding, is presented. It provides high productivity of welding in comparison with aluothermal welding and required mechanical properties of the joints. Restoration of surface of rails and parts of crossing pieces is recommend to be performed using semi-automatic arc surfacing with self-shielded flux-cored wire. Ref. 4, Tabl. 1, Fig. 3.

Поступила в редакцію 10.01.2018

### Вниманию читателей!

Вышел в свет пилотный выпуск информационного бюллетеня «Электрод информ» международной ассоциации «Электрод» ([www.assotiation-electrode.com](http://www.assotiation-electrode.com)). Это издание планируется сделать ежеквартальным.

В номере:

- ▶ Международный научно-практический семинар производителей сварочных материалов
- ▶ Выставка «Weldex/Россварка 2017»
- ▶ В международной ассоциации «Электрод»
- ▶ 40-летие Опытного завода сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины
- ▶ Поздравляем (именинники октября, ноября, декабря)
- ▶ Фотогалерея участия в выставке «Россварка 2017»
- ▶ Поздравляем с 75-летним юбилеем З. А. Сидлина
- ▶ Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Гаврилюк Ю. А. Современные направления применения сварки порошковой проволокой низколегированных сталей повышенной и высокой прочности
- ▶ У истоков металлургических основ сварки (к 110-летию со дня рождения В. И. Дятлова)
- ▶ Знакомим с новыми членами ассоциации «Электрод» — АО «Белоречский металлургический комбинат»
- ▶ Календарь выставок и конференций (I квартал 2018 г.)



Информационная поддержка — журнал «Автоматическая сварка».

## ПРИМЕНЕНИЕ СВАРКИ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ЧУГУННОГО ПЕРИЛЬНОГО ОГРАЖДЕНИЯ МОСТА КОЦЕБУ В ОДЕССЕ

В. Д. ПОЗНЯКОВ, Ю. В. ДЕМЧЕНКО, А. М. ДЕНИСЕНКО, Г. В. ЖУК, В. Б. КОЗЫРЕВ  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты оценки фактического состояния чугунного перильного ограждения моста Коцебу и возможности применения сварки для его реставрации. Согласно указаний СРП 2007.4.1 по проведению реставрационных работ на объектах культурного наследия, осуществлен экспертный осмотр демонтированных элементов, составлены дефектные ведомости и выполнен комплекс исследований по идентификации и свариваемости чугуна. Установлено, что особенности свариваемости такого чугуна обусловлены его перлитной структурой, содержанием углерода, газонасыщенностью, проникновением продуктов коррозии вглубь основного металла, низкой пластичностью, а также склонностью к образованию в металле ЗТВ цементита, ледебурита и сварочных напряжений. Разработаны принципы минимизации влияния этих факторов на свариваемость. Отработан подход к выбору способа сварки и сварочных материалов. Установлено, что наиболее полно требованиям удовлетворяет механизированный способ сварки самозащитной высоконикелевой проволокой марки ПАНЧ-11. На его основе разработана и реализована в авторском сопровождении технология восстановления целостности всех основных архитектурно-декоративных элементов перильного ограждения (решеток, гербов и карнизов). Библиогр. 7, табл. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* перильное ограждение, архитектурно-декоративные элементы, перлитный чугун, свариваемость, реставрация, механизированная МАГ сварка, самозащитная высоконикелевая проволока ПАНЧ-11

Мост Коцебу — один из самых известных одесских мостов был сооружен в 1892 г. (архитектор Ландесман С. А.) над Карантинной балкой, ныне Деволановский спуск), соединив два участка улицы Полицейской (ныне Бунина). Его несущие металлические конструкции изготавливались во Франции в мастерских Густава Эйфеля, который на то время уже прославился как создатель в 1889 г. наиболее высокого строения в мире — Эйфелевой башни высотой 324 м. Металлоконструк-

ции моста как и башни изготовлены из одинаковых материалов, в тех же условиях и практически в одно время, что мотивировало одесситов даже назвать его младшим братом башни Эйфеля. Монтаж осуществлялся на месте установки в г. Одесса. Общий вид моста в конце XIX века представлен на рис. 1. Назван в честь последнего Новороссийского генерал-губернатора Коцебу П. Е. Мост украшает литое чугунное перильное ограждение. На специальных решетках в центре панно вмон-



Рис. 1. Общий вид моста в конце XIX века

© В. Д. Позняков, Ю. В. Демченко, А. М. Денисенко, Г. В. Жук, В. Б. Козырев, 2018

тированы литые гербы Одессы — по одному с каждой стороны. За свою оригинальность перильное ограждение моста в 1985 г. удостоено статуса культурного наследия, а в 2008 г. мост внесен в государственный реестр недвижимых памятников архитектуры.

Изменение облика перильного ограждения за 125-летнюю историю удалось отследить на основе анализа фотоснимков из тематических публикаций о мосте Коцебу в городских средствах массовой информации, поскольку технических документов не сохранилось. На рис. 2 видно общее неудовлетворительное состояние ансамбля перильного ограждения. Столбы ограждения от падения спасали заливкой внутренней полости бетоном и установкой растяжек (рис. 2, а), что

препятствовало передвижению тротуаром. Практически было утрачено большинство съемных перил, за исключением нескольких, отлитых заодно с решетками, очевидно при послевоенной реставрации еще в середине XX века. Что касается подгербовых решеток, то они были усилены в это же время швеллерами (рис. 2, б), что явно снижало художественную составляющую восприятия шедевра искусства литья. Гербы утратили свои завитковые украшения — волноту (рис. 2, в).

В 2011 г. несущие конструкции проезжей части моста и ансамбль чугунного перильного ограждения признаны аварийными и нуждающимися в капитальном ремонте, в связи с чем мост вывели из эксплуатации и в июне 2016 г. начали его реконструкцию. Проектом реконструкции предусмотрены реставрация и сохранение оригинальной арочной части, без вовлечения ее в работу мостовых конструкций. Транспортную нагрузку на себя теперь возьмут новые пролетные конструкции, удовлетворяющие современным требованиям. Что касается перильного ограждения, то после реставрации оно должно сохранить свое предназначение в прежнем облике.

Генподрядчик реконструкции моста Коцебу ООО «РОСДОРСТРОЙ» поручил Институту электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины выполнить в соответствии с требованием указаний [1] по проведению реставрационных работ на объектах культурного наследия, оценку фактического состояния перильного ограждения и возможности применения сварки для его реставрации с максимально высокой степенью сохранения аутентичности. В сжатые сроки предстояло изучить конструктивное, техническое и художественное состояние сохранности, установить наиболее вероятные факторы, причины и масштабы потери целостности, подготовить дефектные ведомости, выполнить комплекс исследований по идентификации и свариваемости конструкционного чугуна, разработать технические решения и технологию сварки для практических задач реставрации, а также осуществить их реализацию при восстановлении поврежденных архитектурно-декоративных элементов ограждения.

Процесс демонтажа архитектурно-декоративных элементов ограждения выполнялся вручную, что не нанесло им существенного вреда. Демонтированные элементы перильного ограждения были пронумерованы и помещены на хранение в складских условиях генподрядчика.

В сентябре-октябре 2016 г. в условиях генподрядчика специалистами ИЭС выполнен первый этап — экспертное обследование всех архитектурно-декоративных элементов перильного ограждения с по-



Рис. 2. Общий вид состояния перильного ограждения моста Коцебу в 2016 г. (до демонтажа): а — панорамный вид; б — тыльная сторона герба на подгербовой решетке; в — лицевая сторона герба на подгербовой решетке

элементной визуальной оценкой фактического состояния и фотофиксацией (рис. 3).

Для принятия решения о ремонтпригодности условно они поделены на две категории. К первой отнесли элементы, которые не подвергаются нагружению в процессе эксплуатации — это карнизы и угловые элементы декора. Ко второй — ответственные элементы ограждения, воспринимающие нагрузки и определяющие несущую способность перильного ограждения — столбы, решетки и гербы. Применяемые критерии оценки ремонтпригодности сваркой деталей второй категории были более жесткими, чем для деталей первой категории.

Особое внимание при обследовании в обоих случаях обращалось на сохранность конструктивного, технического и художественного состояний. По результатам обследования составлены дефектные ведомости и акты технического состояния, а также заключение о ремонтпригодности. В обобщенном виде результаты обследования представлены в табл. 1 и 2, а примеры состояния некоторых деталей — на рис. 4.

В ходе обследования установлено, что массовое разрушение столбов и утрата несущей способности (рис. 4, а) вызваны комплексной причиной. Она заключается в конструктивных особенностях — наличии проблемных коррозионных зон внутри полой конструкции, низких механических характеристиках чугунного литья, плотной посадке решеток на штатных местах, вибрации от движения транспорта, усиленной собственным весом и весом навесных элементов, жестком действии низких температур и воды во всех ее проявлениях. Наиболее ответственными за разрушение являются усталость металлоконструкций моста в процессе длительного срока эксплуатации и коррозия. Поэтому в связи с низкой степенью сохранности и утратой несущей способности, а также высокой ответственностью данных элементов в составе перильного ограждения рекомендовано все столбы отлить заново.

Анализ показал, что характерные дефекты на решетках (рис. 4, б), гербах (рис. 4, в) и внешней горизонтальной поверхности карнизов (рис. 4, д): трещины, утраченные фрагменты, коррозионные повреждения исключительно последствия монтажных ошибок, действия времени и длительной эксплуатации. Они связаны с отсутствием надлежащего текущего ухода, некорректными реставрационными вмешательствами, неудачными конструктивными решениями при создании элементов, особенно подгербовых решеток и низкой пластичностью конструкционного чугуна.

На основе всестороннего анализа степени поврежденности карнизов, гербов и решеток ограждения,



Рис. 3. Рабочий момент совместного экспертного обследования архитектурно-декоративных элементов перильного ограждения моста Коцебу с представителями департамента охраны культурного наследия ОГА

дения, с учетом высокой степени сохранности конструктивного и художественного состояний пришли к выводу о потенциальной возможности восстановления их пригодности для дальнейшей эксплуатации в проектном режиме и в прежнем облике с использованием сварки. Для устранения конструктивных недостатков подгербовых решеток с учетом их нагруженности предложено восстановить их в виде комбинированной сварно-литой конструкции. Принятию решения также способствовал научный опыт сварки серых и высокопрочных чугунов и участие в реставрации чугунных колонн Киевской филармонии (XIX век), пилястров здания Кабинета министров (первая половина XX века), а также несущих деталей технологического оборудования (XX век) [2].

На практике специалисты по структуре излома определяют марку чугуна и оценивают его свариваемость. В нашем случае свежие изломы имели мелкозернистую структуру светло-серого цвета, что предварительно положительно характеризовало «французский» чугун с точки зрения свариваемости.

Исследование проб металла, отобранных для его идентификации, выполнялось в аналитической лаборатории Института (аттестат аккредитации НАА Украины № 2Н362 от 14.01.2014 г.). Состав чугуна определяли на рентгеновском спектрометре «Спектровак-1000» модель DV-4 (фирма Baird, США), металлографические исследования микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе «NEOFOT 32» [3], твердость измеряли на приборе Виккерса [4]. Установлено, что детали ограждения отлиты из чугуна следующего химического состава, мас. %: 3,10...3,35 С; 0,37...0,40 Mn; 1,40...1,58 Si; S < 0,2; P < 0,15. Микроструктура чугуна такой композиции являет-

Таблица 1. Перечень архитектурно-декоративных элементов демонтированного перильного ограждения, представленных для экспертного осмотра

Но- мер	Название архитек- турно-декоратив- ного элемента	Количество, шт. (учетный номер №)					
		По про- екту	В на- личии	Не требует ремонта	Ремонтоприго- ден сваркой	Неремонтоприго- ден сваркой	Изготовить литьем или др.
1	Столб перильного ограждения	44	44	3 (1,11,44)	--	41 (2-10, 12-43)	44
2	Решетка огражде- ния (длинная)	40	40	29 (2-5, 7, 8, 16-19, 21-23, 25-34, 37-41, 44)	11 (1, 6, 9-15, 20, 42)	-	-
3	Решетка огражде- ния (короткая)	4	3	1 (43)	2 (35, 36)	-	1
4	Решетка огражде- ния (подгербовая)	2	2	-	-	2 (24, 45)	2**
5	Перило	42	12	6 (1,2,3,4,5,6)	-	6 (7, 8, 9, 10, 11, 12)	36
6	Угловой элемент декора	43	43	40	3	--	--
7	Карниз (длинный)	42	42	35 (1-4, 6-8, 10-18, 21-26, 28-30, 32-39, 41, 45)	7 (5, 9, 19, 20, 27, 31, 40)	--	--
8	Карниз (короткий)	3	3	2 (42, 43)	1 (44)	-	-
9	Герб	2	2	-	2	-	2*

Примечание. \* —изготовить литьем недостающий фрагмент; \*\* — изготовить полностью.

Таблица 2. Классификация дефектов и содержание ремонта архитектурно-декоративных элементов подперильного ограждения

Но- мер	Название архитек- турно-декоративного элемента	Характерные дефекты	Содержание ремонта, технические решения.
1	Столбы перильного ограждения	Коррозионное и механическое повреждение, утрата элементов	Отлить заново из серого чугуна СЧ20 ГОСТ 1412 в проектном количестве 44 шт.
2	Решетки ограждения (длинные)	Утрата элементов подперильного или опорного пояса. Трещины в поясах	Взамен утраченных элементов в поясах использовать замещающий материал. Трещины заварить
3	Решетки ограждения (короткие)	Утрата элементов подперильного и опорного пояса. Трещины	->-
4	Решетка ограждения (подгербовая)	Общее разрушение, утрата элементов	Изготовить новую решетку в соответствии с чертежом комбинированной конструкции с сохранением оригинальных элементов декора. Недостающие элементы декора отлить
5	Перила	Общее разрушение или утрата	Отлить заново из серого чугуна СЧ20 ГОСТ 1412 в количестве 36 шт.
6	Угловые элементы декора	Повреждения, трещины	Трещины заварить
7	Карнизы (длинные)	Утрата фрагментов в зоне монтажных вырезов. Трещины на внешней горизонтальной поверхности.	Взамен утраченных фрагментов использовать стальные вставки. Трещины заварить
8	Карнизы (короткие)	Утрата фрагментов в зоне монтажных вырезов. Трещины на внешней горизонтальной поверхности.	Взамен утраченных фрагментов использовать стальные вставки. Трещины заварить.
9	Гербы	Утрачены элементы завиткового украшения – волюты.	Отлить из серого чугуна СЧ20 ГОСТ 1412 утраченные элементы по чертежу и приварить

ся главным фактором, определяющим свойства, как правило должна быть ферритно-перлитной или перлитной. По результатам металлографических исследований установлено, что это типичная перлитная структура, в которой присутствует фосфидная эвтектика, отличающаяся повышенной твердостью и хрупкостью. Интегральная твердость составляет не более  $HV\ 300$ . Поскольку было принято решение все столбы отлить заново, а также изготовить литьем перила и фрагменты

украшения гербов взамен утраченных, то предстояло подобрать соответствующую марку отечественного чугуна. Необходимым требованиям отвечает наиболее близкий к оригиналу — серый чугун марки СЧ 20 [5].

Свойства чугуна как сложного поликомпонентного конструкционного материала могут быть резко изменены сварочным процессом. Поэтому технологический процесс сварки должен учитывать факторы, влияющие на свариваемость. Все основ-



Рис. 4. Примеры состояния характерных деталей перильного ограждения: установленного при экспертном осмотре: *а* — столбы №№ 25, 26, 27; *б* — решетка №11; *в* — подгербовая решетка № 24; *г* — герб № 1; *д* — карниз № 8; *е* — угловые элементы декора № 1, 2, 3

ные элементы технологического процесса — погонная энергия, степень нагрева, скорость охлаждения, порядок выполнения швов определялись с учетом особенностей «французского» чугуна и его структурных превращений в рамках требований [6].

Комплекс исследований, проведенный в ИЭС, показал, что особенности свариваемости «французского» чугуна обусловлены не только его структурой в изломе, но и перлитной микроструктурой, содержанием углерода, газонасыщенностью, проникновением продуктов коррозии в основной металл, низкой пластичностью, а также склонностью к образованию в металле ЗТВ структур цементита, ледебурита и сварочных напряжений. Для практических задач реставрации деталей разработаны принципы минимизации влияния этих факторов на свариваемость. Они состоят в том, что сварку необходимо выполнять многослойными швами небольшой протяженности с существенным ограничением тепловложения и использованием сварочных материалов, затрудняющих диффузию углерода из основного металла в шов, как правило, высоконикелевых. Сварка должна осуществляться в узкую разделку с соблюдением определенной последовательности ее заполнения, без поперечных колебаний электро-

да и сопровождаться послойной проковкой швов. Отработан подход к выбору рациональных способа сварки и сварочных материалов. Проверено несколько вариантов, необходимых для сварки серого чугуна современных сварочных проволок и электродов отечественного и зарубежного производства. Установлено, что для сварки «французского» чугуна наиболее полно требованиям отвечает только механизированный способ сварки самозащитной высоконикелевой проволокой марки ПАНЧ-11 [7] диаметром 1,2 мм (ТУ48-21-593-85, и только производства 1987 г.). Сварные соединения, выполненные ПАНЧ-11, отличаются повышенной стойкостью против околошовных трещин по сравнению с соединениями, полученными аналогами этой проволоки и электродами для ручной сварки при идентичном химическом составе металла шва. Состав проволоки позволяет выполнять сварку без подогрева. При этом обеспечивается получение пластичного аустенитного шва с твердостью не более *HV* 200. Свойства сварного соединения в целом определяются свойствами основного металла. В зоне сплавления не наблюдается заметного количества ледебурита и структурно-свободного цементита. В металле ЗТВ имеются продукты неравновесного распада аустенита (троостит, мартенсит), что несколько по-



Рис. 5. Фрагменты реставрационных работ: *а* — реставрация сваркой подгербовой решетки; *б* — финишная зачистка сварных швов; *в* — вид ремонтного стыка на коротком карнизе; *г* — вид ремонтного стыка на решетке № 13; *д* — вид гербов до реставрации (на переднем плане вновь отлитые фрагменты утраченных украшений — волути); *е* — вид герба № 1 после реставрации

вышает твердость до  $HV\ 350$ . Поскольку ширина ЗТВ не превышает  $150\ \mu\text{м}$ , ее влияние на свойства соединений малозначимо. Состав проволоки ПАНЧ-11 обеспечивает также высокую стойкость швов против образования горячих трещин в результате нейтрализации вредных примесей и придания неметаллическим включениям глобулярной формы.

Устойчивый процесс сварки проволокой ПАНЧ-11 легко осуществляется на прямой полярности и при режиме:  $I_{\text{св}} = 110...140\ \text{А}$ ,  $U_{\text{д}} = 16...18\ \text{В}$ , необходимом в целях малого тепловложения в основной металл. Глубина проплавления основного металла составляет  $1,5...2,0\ \text{мм}$ . Сварка может выполняться во всех пространственных положениях, однако приоритетными являются нижнее и наклонное. Металл шва характеризуется такими показателями механических свойств:  $\sigma_{\text{T}} = 350\ \text{МПа}$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 450\ \text{МПа}$ ,  $\delta = 15\ \%$ . Образцы на статическое растяжение разрушаются за пределами металла шва. Существенным преимуществом является возможность выполнения сварки в узкую разделку кромок в виде щели, что в значительной мере облегчает получение соединений без продольных и поперечных трещин, а также комбинированных соединений со сталью.

По результатам исследований разработана оптимальная ремонтная технология сварки, при-

меняемая для всех архитектурно-декоративных элементов перильного ограждения, требующих восстановления, и детальный план их реставрации с учетом фактического состояния. Особенности технологии отражены в инструкциях для каждого ремонтного случая (WPS) согласно требований к технологическому процессу сварки чугуна ГОСТ 30430-96. Результаты выполнения реставрационных работ представлены на рис. 5, 6. В августе 2017 г. после окрашивания грунтом отреставрированное перильное ограждение было установлено ко дню города, который отмечается в сентябре, на реконструированном мосту Коцебу, а впоследствии в ноябре, после завершения всего комплекса отделочных работ на прилегающей территории и установки фонарей, все металлоконструкции были повторно отпескоструены и окрашены в предусмотренный проектом цвет (рис. 7).

В итоге необходимо отметить, что при проведении подготовительных и реставрационных работ всего комплекта архитектурно-декоративных элементов перильного ограждения моста Коцебу устранены ряд упущений и ошибок, допущенных как при создании, так и при реставрации в прошлые годы и сделать их весьма надежными элементами перильного ограждения, применив соответствующие конструкторско-технические решения, современные сварочные технологии и ма-



Рис. 6. Общий вид ансамбля перильного ограждения (август–сентябрь 2017 г.): *a* — вид обновленного панно решеток ограждения; *б* — подгербовая решетка с гербом (вид со стороны тротуара); *в* — вид с внешней стороны моста



Рис. 7. Общий вид реконструированного моста с реставрированными архитектурно-декоративными элементами перильного ограждения (ноябрь 2017 г.)

териалы. Основной принцип, которого придерживались специалисты — максимальное сохранение аутентичности и несущей способности реставрируемых элементов. Желаемый результат достигнут благодаря деловому и конструктивному сотрудничеству организатора и участников проекта,

а также консультативной поддержке департамента охраны культурного наследия Одесской ГА.

#### Список литературы

1. (2011) СРП-2007.4.1. Часть 4.1. *Рекомендации по ведению реставрационных работ на объектах культурно-*

го наследия – памятниках монументальной скульптуры (4-я ред.)

2. Демченко Ю. В., Денисенко А. М. (2011) Восстановление работоспособности уникальных толстостенных деталей из чугуна оборудования метрополитена. *Сварщик*, 3, 6–9.
3. (2005) ГОСТ344-87. *Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.*
4. (1993) ГОСТ 2999-75. *Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.*
5. (1987) ГОСТ 1412-85. *Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки.*
6. (1996) ГОСТ 30430-96. *Дуговая сварка конструкционных чугунов. Требования к технологическому процессу.*
7. (1987) ТУ 48-21-593-85. *Проволока сварочная из сплава ПАНЧ-11. Технические условия.*

## References

1. SRP-2007.4.1. Pt 4.1: *Recommendations for performance of restoration works on objects of cultural heritage – monuments of monumental sculpture.* 4th ed. [in Russian].
2. Demchenko, Yu.V., Denisenko, A.M. (2011) Recovery of serviceability of versatile thick-wall parts from cast iron in metro equipment. *Svarshchik*, 3, 6-9 [in Russian].
3. (2005) GOST 344-87: *Foundry goods with different shape of graphite. Methods of determination of structure* [in Russian].
4. (1993) GOST 2999-75: *Metals and alloys. Method of Vickers hardness measurement* [in Russian].
5. (1987) GOST 1412-85: *Spheroidal graphite iron for castings. Grades* [in Russian].
6. (1996) GOST 30430-96: *Arc welding of structural cast irons. Requirements to technological process* [in Russian].
7. (1987) TU 48-21-593-85: *Welding wire from PANCh-11 alloy. Specifications* [in Russian].

В. Д. Позняков, Ю. В. Демченко,  
А. М. Денисенко, Г. В. Жук, В. Б. Козирев

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

## ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ РЕСТАВРАЦІЇ ЧАВУННОГО ПОРУЧНЕВОГО ОГОРОДЖЕННЯ МОСТУ КОЦЕБУ В ОДЕСІ

Представлені результати оцінки фактичного стану чавунної перильної огорожі мосту Коцебу і можливості застосування зварювання для її реставрації. Згідно вказівок СРП 2007.4.1 з проведення реставраційних робіт на об'єктах культурної спадщини, здійснений експертний огляд демонтованих елементів, складені дефектні відомості та виконано комплекс досліджень по ідентифікації і зварюваності чавуну. Встановлено, що особливості зварюваності такого чавуну обумовлені його перлітною структурою, вмістом вуглецю, газонасиченістю, проникненням продуктів корозії в основний метал,

низькою пластичністю, а також схильністю до утворення в металі ЗТВ цементиту, ледебуриту і зварювальних напружень. Розроблено принципи мінімізації впливу цих факторів на зварюваність. Відпрацьовано підхід до вибору способу зварювання і зварювальних матеріалів. Встановлено, що найбільш повно вимоги задовольняє механізований спосіб зварювання самозахисним високонікелевим дротом марки ПАНЧ-11. На його основі розроблена і реалізована в авторському супроводі технологія відновлення цілісності всіх основних архітектурно-декоративних елементів перильної огорожі (решіток, гербів і карнизів). Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 7.

*Ключові слова:* перильна огорожа, архітектурно-декоративні елементи, перлітний чавун, зварюваність, реставрація, механізоване МАГ зварювання, самозахисний високонікелевий дріт ПАНЧ-11

V.D. Poznyakov, Yu.V. Demchenko, A.M. Denisenko,  
G.V. Zhuk, V.B. Koznyrev

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

## APPLICATION OF WELDING FOR RESTORATION OF CAST IRON RAILING OF THE KOTZEBUE BRIDGE IN ODESSA

The results of evaluation of real condition of cast iron railing of the Kotzebue Bridge and the opportunity of welding application for its restoration are presented. According to the instructions SRP 2007.4.1 on carrying out restoration works on the cultural heritage objects, an expert examination of the disassembled elements was carried out, the lists of defects were compiled and the complex of investigations on identification and weldability of cast iron was carried out. It was established that the peculiarities of weldability of such cast iron are predetermined by its pearlite structure, carbon content, gas saturation, penetration of corrosion products deep into base metal, low ductility, as well as tendency to formation of cementite, ledeburite and welding stresses in HAZ metal. The principles of minimizing the influence of these factors on weldability were developed. The approach to selection of welding method and welding consumables was mastered. It was established that the mechanized method of welding using self-shielding high-nickel wire of grade PANCH-11 meets mostly the specified requirements. On its basis, the technology for restoring integrity of all the main architectural and decorative elements of railing (grates, emblems and cornices) was developed and implemented in the author's accompaniment. 7 Ref., 2 Tab., 7 Fig.

*Keywords:* railing, architectural and decorative elements, pearlitic cast iron, weldability, restoration, mechanized MAG welding, self-shielding high-nickel wire

Поступила в редакцію 24.01.2018

## XI Международная научно-техническая конференция «ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ – 2018»

4–8 июня 2018, Киев, КПИ

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Ю. С. БОРИСОВ, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, А. Н. КИСЛИЦА, С. Н. КАЛЮЖНЫЙ, В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе описывается получение резистивного нагревательного элемента из многослойных покрытий, которые были нанесены на стальную основу методом микроплазменного напыления. Для формирования узких резистивных дорожек использован  $TiO_2$  в виде порошка с размером частиц 15...40 мкм. В качестве электроизоляции от стальной основы нанесен подслои из  $Al_2O_3$  с размером частиц 40 мкм. Проведенные испытания резистивных нагревательных элементов показали их работоспособность до температуры 200 °С при удельной мощности 75 Вт. Повышение температуры нагрева резистивного нагревательного элемента на воздухе выше 230 °С приводит к потере электропроводности. Основными возможными областями применения таких резистивных нагревательных элементов являются: машиностроительная, химическая и радиоэлектронная промышленности. В результате проведенного эксперимента показана принципиальная возможность изготовления резистивных нагревательных элементов с резистивными дорожками из  $TiO_2$  с применением технологии микроплазменного напыления. Библиогр. 18, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* электронагреватель, резистивный нагревательный элемент, диоксид титана, микроплазменное напыление

Электронагреватели широко используются в бытовых и промышленных устройствах. В домашнем хозяйстве широкое применение нашли такие электронагревательные приборы, как электрические плитки, утюги, электро-водонагреватели, электрокипятильники и так далее. В промышленности электронагреватели используются для нагрева химических растворов, печей по обработке металлов, обогрева шкафов автоматики и станций управления, в изготовлении тепловентиляторов и так далее.

Главной частью электронагревателя является резистивный нагревательный элемент (РНЭ). К материалам, применяемым в промышленном изготовлении РНЭ, предъявляют следующие требования: высокое электрическое сопротивление в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения и высокой жаростойкостью. Наиболее распространенные промышленные РНЭ изготавливают из железохромоникелевых и никель-хромовых сплавов марок Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т, Х15Н60 и других, отличающихся высоким удельным электрическим сопротивлением. Использование данных материалов в РНЭ позволяет эксплуатировать их до температур 1200...1300 °С. Следующим классом более высокотемпературных РНЭ являются серийно выпускаемые цилиндрические нагреватели из полупроводниковых керамических материалов SiC, MoSi<sub>2</sub>. Нагреватели данного вида используются для нагрева до более высоких температур,

порядка 1500...1700 °С по сравнению с металлическими. В изготовлении РНЭ нашли применение также и другие керамические материалы, характеризующиеся полупроводящими свойствами, такие как ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, LaCrO<sub>3</sub> [1–3]. Широкое применение полупроводниковых керамических материалов обусловлено тем, что они имеют более высокое удельное сопротивление и меньший температурный коэффициент линейного расширения, чем металлические. Конструктивной особенностью металлических РНЭ является необходимость электроизоляции токопроводящей спирали от нагреваемой поверхности. В качестве электроизолятора в основном используют воздушную прослойку. Такая конструкция металлических РНЭ приводит к снижению коэффициента теплопередачи, рассеиванию тепла в окружающее пространство, усложнению конструкции и увеличению габаритных размеров РНЭ, что в некоторых случаях влияет на их дальнейший монтаж. Для увеличения коэффициента теплопередачи и уменьшения габаритов электронагревательных приборов возможно применять РНЭ в виде резистивных покрытий (дорожек), нанесенных непосредственно на нагреваемую поверхность [4–6]. Перспективным материалом для применения в РНЭ по своим электрофизическим свойствам является диоксид титана (TiO<sub>2</sub>). Материал имеет свойства полупроводника [7, 8] с температурой плавления 1800 °С, успешно используется в электронике, машиностроении и других областях промышленности,

является самым доступным полупроводниковым керамическим материалом на рынке. Имеются также данные по успешному использованию  $\text{TiO}_2$  для изготовления РНЭ в виде цилиндрического ролика мощностью 540 Вт [1]. В качестве электроизоляционных материалов используются материалы на основе керамики. Известными представителями таких материалов являются  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Sr}_2\text{O}_3$ . Наибольшее распространение получил  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Его использование обусловлено высокими диэлектрическими свойствами при повышенных температурах (5...9 кВ/мм) [9] и невысокой стоимостью.

В настоящее время резистивные дорожки получают такими методами, как трафаретная печать, намазка, фотолитография, вакуумно-конденсационное осаждение и другие [4, 5]. Среди существующих методов получения резистивных дорожек в качестве перспективной технологии рассматривается газотермическое нанесение покрытий (ГТНП). Такая технология имеет следующие преимущества: широкий выбор материалов, формирование покрытия на поверхности или локальном участке изделия, изготовленного практически из любого материала, высокая производительность, простота технологического процесса с возможностью его автоматизации.

**Материалы и оборудование для нанесения покрытий.** В последнее время методы ГТНП позволяют получать покрытия на различных деталях для радиоэлектроники и приборостроения. Есть успешные результаты, демонстрирующие возможности их применения и для изготовления РНЭ [10, 11]. Основными недостатками, препятствующими применению ГТНП для производства РНЭ на существующем оборудовании газотермического напыления, являются большие потери материала при нанесении узких резистивных дорожек шириной менее 6 мм, а также вероятность перегрева и коробления изделия в результате большого термического влияния плазменной струи. Учитывая необходимость формирования тонких, узких резистивных дорожек и предотвращения коробления подложки, было предложено использовать технологию микроплазменного напыления (МПН). Она позволяет получать покрытия из разного рода как металлических, так и керамических материалов, значительно сокращать потери напыляемого материала благодаря небольшому диаметру пятна напыления, оказывая при этом минимальное термическое влияние на подложку [12].

На основании проведенного анализа в качестве материала для получения резистивных покрытий был выбран порошок диоксида титана с размером частиц 15...40 мкм и текучестью  $83 \text{ с}^{-1}$  (ГОСТ 20899-75). Данный материал имеет линейный коэффициент тепло-

вого расширения  $8,19 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  и высокое удельное электрическое сопротивление  $3 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  [13], химическую стойкость и электропроводность в окислительных газовых средах, достаточную для резистивного саморазогрева от комнатной температуры. Диоксид титана является одним из самых доступных полупроводниковых керамических материалов на рынке. Для нанесения электроизоляционных покрытий использовали порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (МРТУ 9-09-3916-75) с размером частиц 40 мкм и текучестью  $130 \text{ с}^{-1}$ . С целью повышения коэффициента использования напыляемого материала (КИМ) применили технологию микроплазменного напыления. Данная технология позволяет наносить узкополосные покрытия из разного рода материалов, значительно сокращает потери напыляемого материала благодаря небольшому диаметру пятна напыления (3...5 мм), оказывая при этом минимальное термическое влияние на подложку, что позволяет получать покрытия на тонкостенных деталях без их коробления [14, 15]. В качестве оборудования для нанесения покрытий была использована установка МПН-004, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 1).

#### Технические характеристики установки МПН-004:

Рабочий газ .....	аргон
Защитный газ.....	аргон
Мощность плазменной струи, кВт .....	до 3,0
Ток, А .....	10...60
Напряжение, В .....	20...50
Расход рабочего газа, л/мин .....	0,5...5
Расход защитного газа, л/мин .....	2...10
Производительность, кг/ч .....	0,1...2,5
КИМ, % .....	0,6...0,9
Габариты, мм .....	500×360×50
Масса, кг .....	44

Рабочие поверхности РНЭ были изготовлены из стали марки Ст3 размером  $70 \times 45 \times 1$  мм (обра-



Рис. 1. Общий вид установки МПН-004

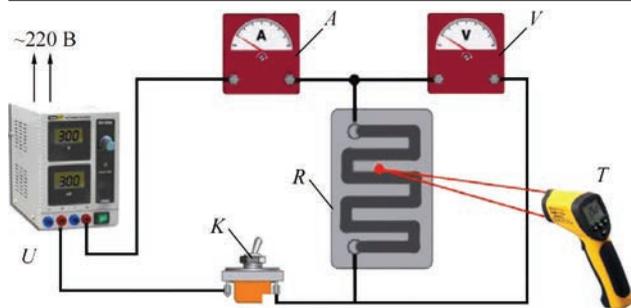


Рис. 2. Схема стенда для исследования свойств резистивных покрытий: *U* — регулируемый источник питания; *K* — выключатель для прерывания подачи электрического тока; *A* — амперметр; *V* — вольтметр; *R* — образец с резистивным покрытием; *T* — тепловизор (пирометр)

зец № 1), и 50×50×2 мм (образец № 2). Газоабразивная обработка рабочей поверхности проводилась электрокорундом марки А95F зернистостью F20-F22, с последующей пятиминутной очисткой поверхности в установке ULTRASONIC CLEANER PS-2 с использованием изопропилового спирта. Электрическая прочность покрытий из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> определялась мегаомметром Ф4102/1. Влияние температуры нагрева на работоспособность резистивной дорожки и мощность РНЭ исследовали на стенде (рис. 2), состоящем из регулируемого источника питания *U*, выключателя для прерывания подачи электрического тока *K*, цифрового мультиметра UNI-T UT70B для измерения тока и напряжения *A*, *V*, тепловизора IRISYS 1020 для измерения температуры и распределения теплоты по РНЭ *T*.

**Технические характеристики тепловизора IRISYS 1020:**

Диапазон измерений температуры, °С	..... -10...300
Детектор	..... пирозлектрический
	.....приемник 16×16
Порог температурной чувствительности, °С	.....0,3
Погрешность измерения температуры, °С не больше	..... ± 5
Оптическое поле зрения, по горизонтали×по вертикали, град.	..... 20×20
Спектральный диапазон, мкм	.....8...14
Частота развертки изображения, кадров, Гц	..... < 9
Система наведения указания	..... лазер класс 2

Микроструктуру покрытий из TiO<sub>2</sub>, полученных методом МПН, исследовали на микроскопе

**Режим микроплазменного нанесения электроизоляционных и резистивных покрытий**

Параметры	Состав покрытия	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Ток, А	45	40
Напряжение, В	30	28
Дистанция напыления, мм	150	150
Расход рабочего газа Ar, л/мин	1,3	1,3
Расход защитного газа Ar, л/мин	4	4
Производительность, г/мин	1,2	2

Neophot 32, пористость определяли методом обработки изображения при помощи компьютерной программы Image Pro 3.

**Изготовление и исследование резистивного нагревательного элемента.** Процесс изготовления РНЭ состоял из следующих этапов.

1. Перед нанесением электроизоляционных и резистивных покрытий основы образцов из стали марки Ст3 подвергали струйно-абразивной обработке под давлением сжатого воздуха 7 атм. После этого проводили ультразвуковую очистку основ для удаления загрязнений и жировых пленок.

2. Для электроизоляции резистивных дорожек от металлической основы методом МПН наносили электроизоляционный слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 300 мкм.

3. После нанесения электроизоляционного слоя для придания в процессе напыления резистивным дорожкам формы меандра на образцы накладывали маски (на образце № 1 из 7, на образце № 2 из 6 спиралей) с последующим нанесением резистивного покрытия из TiO<sub>2</sub> методом МПН. Параметры нанесения электроизоляционного покрытия и резистивных дорожек приведены в таблице.

4. Сформированные резистивные дорожки имели следующие геометрические размеры: длина дорожки на образцах № 1 и 2 была 312 и 295 мм соответственно, ширина дорожек на обоих образцах составляла 4 мм, толщина резистивного слоя (TiO<sub>2</sub>) — 150 ± 50 мкм.

5. Для изоляции резистивных дорожек от окружающей среды на образце № 2 дополнительно поверх дорожек был нанесен тем же методом слой

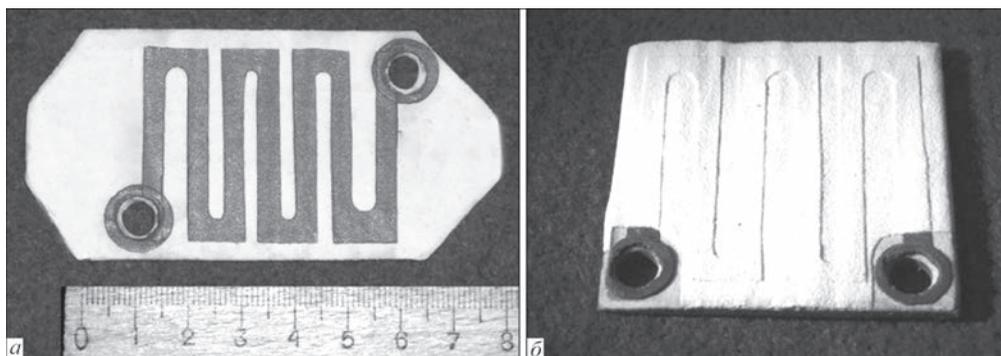


Рис. 3. Резистивный нагревательный элемент: *а* — образец № 1 (двухслойное покрытие из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub>); *б* — образец № 2 (трехслойное покрытие из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub>)

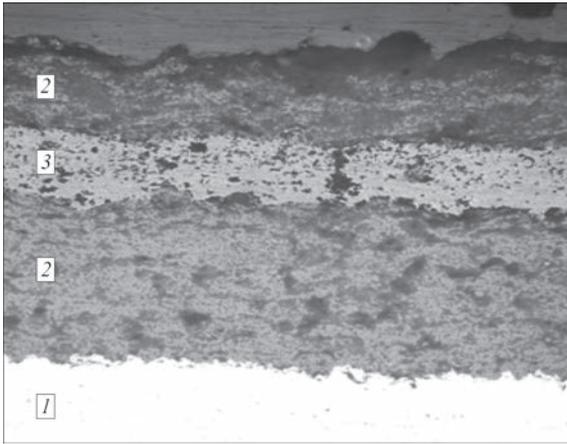


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 200$ ) трехслойного покрытия РНЭ № 2: 1 — основа; 2 — слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 — слой  $\text{TiO}_2$

$\text{Al}_2\text{O}_3$ , толщиной 150 мкм (режимы нанесения в таблице). Внешний вид изготовленных керамических РНЭ и микроструктура нанесенных покрытий приведены на рис. 3 и 4.

Анализ микроструктуры покрытий (рис. 4) показал, что полученные резистивные дорожки имеют равномерную толщину  $150 \pm 50$  мкм, электроизоляционный слой (основа–резистивная дорожка) толщиной  $400 \pm 100$  мкм и внешний электроизоляционный слой толщиной  $150 \pm 30$  мкм. Пористость покрытий из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составила 20...25 %, а из  $\text{TiO}_2$  10...13 %. Проведенное исследование электрической прочности электроизоляционного слоя из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $400 \pm 100$  мкм показало, что она составила 500 МОм при 1000 В на  $6 \text{ мм}^2$ . Полученные данные свидетельствуют о том, что покрытие из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обеспечивает необходимые электроизоляционные свойства [16].

Исследование электропроводности проводили на образце № 1, поскольку он не имел внешнего защитного покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что позволяло измерять температуру резистивной дорожки

непосредственно на ее поверхности без влияния внешнего электроизоляционного слоя. При подаче на токоподводящие контакты РНЭ переменного напряжения в 250 В было получено максимальное значение тока 0,3 А, что соответствует удельной мощности РНЭ 75 Вт. В процессе эксперимента происходил постепенный нагрев резистивных дорожек и распределение тепла по элементу, что фиксировалось прибором IRISYS 1020 (рис. 4) с временным интервалом в 5 с.

На рис. 5, а–г показано зафиксированное прибором IRISYS 1020 распределение тепла по РНЭ согласно шкале температур. Начальная температура РНЭ составляла 26 °С (рис. 5, а). При достижении резистивной дорожкой температуры выше 230 °С произошла потеря проводящих свойств покрытия.

**Обсуждение и перспективы.** В результате проведенного эксперимента показана принципиальная возможность применения МПН для изготовления РНЭ с использованием порошков  $\text{TiO}_2$  для формирования резистивных дорожек. Резистивные покрытия из  $\text{TiO}_2$ , полученные методом МПН, позволяют проводить нагрев основы до температуры 200 °С без потери работоспособности РНЭ. Повышение температуры свыше 230 °С приводит к локальному перегреву дорожки с потерей электропроводности. Ограничение температуры и потеря проводимости, очевидно, обусловлено структурой газотермических покрытий, которые отличаются наличием неоднородности и пористостью. В процессе нагрева на воздухе резистивных покрытий, полученных методом МПН из  $\text{TiO}_2$ , происходит увеличение сопротивления в зонах с неоднородной структурой покрытия с последующим их перегревом и потерей электропроводности [17, 18].

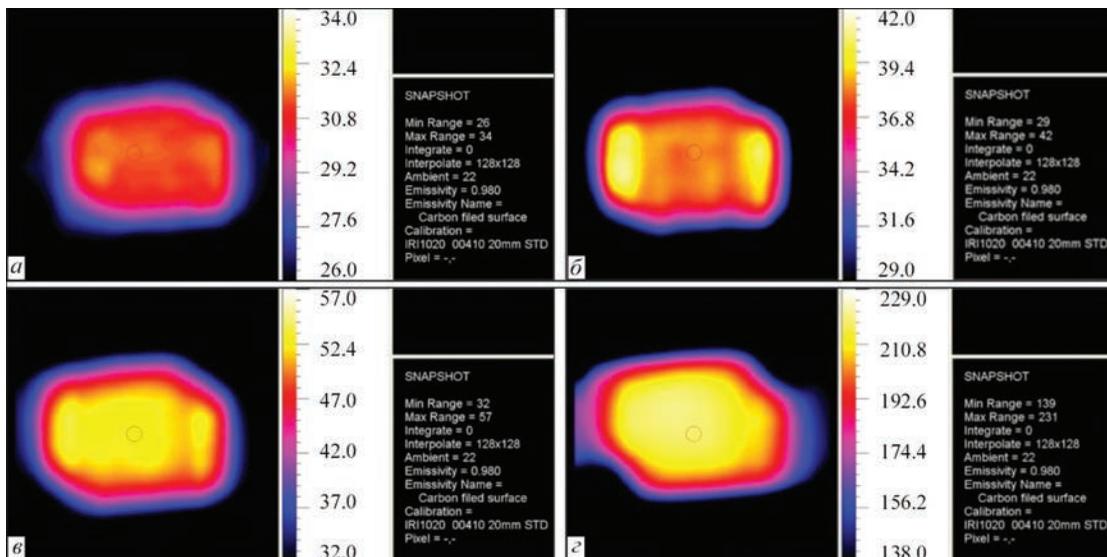


Рис. 5. Распределение тепла по резистивным дорожкам из  $\text{TiO}_2$  в зависимости от времени (описание а–г см. в тексте)

Данные резистивные покрытия могут найти практическое применение при изготовлении РНЭ для защиты электродвигателей и генераторов от влажности, обогреве водяных насосов в зимний период для предотвращения их обледенения, поддержания постоянной температуры внутри электрошкафов с автоматикой, обогреве задвижных клапанов, а также в производстве спецтехники для суровых климатических условий, где требуется подогрев горюче-смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания.

### Выводы

1. Проведен анализ конструктивных особенностей РНЭ и материалов, используемых при их изготовлении. Определены материалы, пригодные для получения резистивных дорожек методом газотермического напыления.

2. Экспериментально доказана возможность получения РНЭ методом микроплазменного напыления. Получены резистивные дорожки из  $TiO_2$  шириной 4 мм и толщиной резистивного слоя  $150 \pm 50$  мкм.

3. Проведенные испытания показали работоспособность РНЭ, полученных методом МПН из  $TiO_2$ , при удельной мощности 75 Вт до температуры 200 °С без потери электропроводности.

4. Определены области практического применения РНЭ с использованием данных покрытий в аппаратуре и узлах оборудования машиностроительной, химической и радиоэлектронной промышленности.

5. Путем повышения рабочей температуры и стабильности электрофизических свойств резистивной дорожки из  $TiO_2$  может быть ее легирование, например, с использованием  $Cr_2O_3$ .

### Список литературы

1. Dipl.-Ing. (FH) Stefan Scheitz, Dr. Filofteia-Laura Toma, Dr. Lutz-Michael Berger and others. (2011) Thermally sprayed multilayer ceramic heating elements. *Thermal spray bulletin*, **2**, 88–92.
2. Барановский Н. Д., Шаронов Е. А., Ванновский В. В. (1991) Электрические свойства плазменных покрытий для плоских нагревательных элементов. *Материалы конф. «Газотермическое напыление в промышленности СССР и за рубежом»*, Ленинград, 27–29 мая 1991 г., Ленинград, ЛД НТП, сс. 60–61.
3. Достанко А. П., Витязь П. А. (2001) *Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники*. Минск, ФУ АИНФОРМ.
4. Иванов А. С., Лебедев Ю. П. (2005) *Нагревательный блок для бытовых электроприборов*. РФ, Пат. 2246804.
5. *Нагревательные элементы фирмы ОНИКС*. <http://опухмef.narod.ru/nagrev.htm>. Доступ на 7. 11. 2017
6. Гоненко Т. В., Хацевский В. Ф., Хацевский К. В. (2010) Инженерный метод расчета плоских многорожечных нагревателей. *Вестник ПГУ*, **3**, 30–34.
7. Хороших В. М., Белоус В. А. (2009) Пленки диоксида титана для фотокатализа и медицины. *Физическая инженерия поверхности*, **7**, **3**, 223–238.
8. Пасынков В. В., Сорокин В. С. (2001) *Материалы электронной техники. Учеб. для студ.* Санкт-Петербург, Лань.

9. Вашкевич Ф. Ф., Спальник А. Я., Плужко И. А. (2009) Электротермоизоляция индукторов для внутреннего нагрева трубных заготовок. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск, ШАСА, сс. 4–6.
10. Лясников В. Н., Перов В. В., Лаврова В. Н. (1977) Применение плазменно-дугового напыления алунда при изготовлении катодно-подогревательного узла. *Электронная техника: Сер. Электроника СВЧ*, **4**, сс. 85–87.
11. Бакланов Д. И., Беляйков И. Н., Вирник А. М. и др. (1996) *Способ изготовления резистивного нагревательного элемента*. РФ, Пат. 2066514 МКИ Н 05 В 3/12.
12. Войнарович С. Г. (2012) Исследование формы и размера пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из гидроксипапирита. *Вестник НУК*, **3**, 81–84. <http://ev.nuos.edu.ua/publication?publicationId=18276>. Доступ на 7. 09. 2017.
13. Самсонов Г. В., Эпик Л. П. (1973) *Тугоплавкие покрытия*. Москва, Металлургия.
14. Борисов Ю. С., Переверзев Ю. Н., Бобрик В. Г. Войнарович С. Г. (1999) Нанесение узкополосных покрытий методом микроплазменного напыления. *Автоматическая сварка*, **6**, 53–55.
15. Кислица А. Н., Кузьмич-Янчук Е. К., Кислица Н. Ю. (2009) Получение узких дорожек методом микроплазменного напыления из NiCr-проволоки. *Сб. тез. Всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов «Сварка и смежные технологии»*. Киев, 27–29 мая 2009, сс. 94.
16. (1976) ГОСТ 1516.1-76. *Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ*.
17. Барабанова Е. В. Заборовский К. М., Посадова Е. М., Кастро Р. А. (2013) Влияние пористости на электрофизические свойства керамики ЦТС. *Известия российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена*, **157**, сс. 79–83.
18. Желлова А. И. (1994) *Синтез и электрические свойства оксидной керамики для применения в электронике*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев. <http://tekhnosfera.com/sintez-i-elektricheskie-svoystva-oksidnoy-keramiki-dlya-primeneniya-v-elektronike>. Доступ на 25.07.17.

### References

1. Scheitz, S., Toma, F.-L., Berger, L.-M. (2011) Thermally sprayed multilayer ceramic heating elements. *Thermal Spray Bull.*, **2**, 88-92.
2. Baranovsky, N.D., Sharonov, E.A., Vannovsky, V.V. (1991) Electrical properties of plasma coatings for plane heating elements. In: *Proc. of Mathematical Conf. on Thermal Spraying in Industry of USSR and Abroad* (Leningrad, 27-29 May 1991). Leningrad, LD NTP, 60-61 [in Russian].
3. Dostanko, A.P., Vityaz, P.A. (2001) *Plasma processes in manufacture of electronic engineering products*. Minsk, FU AINFORM [in Russian].
4. Ivanov, A.S., Lebedev, Yu.P. (2005) *Heating block for household electric appliances*. Pat. 2246804 RF [in Russian].
5. Heating elements of ONIX Company. <http://mef.narod.ru/nagrev.htm> [in Russian].
6. Gonenko, T.V., Khatsevsky, V.F., Khatsevsky, K.V. (2010) *Engineering approach of calculation of multi-track heaters*. *Vestnik PGU*, **3**, 30-34 [in Russian].
7. Khoroshikh, V.M., Belous, V.A. (2009) Films of titanium dioxide for photocatalysis and medicine. *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, **7(3)**, 223-238 [in Russian].
8. Pasyнков, V.V., Sorokin, V.S. (2001) *Materials of electronic engineering: Manual*. St.-Petersburg, Lan [in Russian].
9. Vashkevich, F.F., Spalnik, A.Ya., Pluzhko, I.A. (2009) Electrothermic insulation of inductors for internal heating of tubular billets. In: *Building, Materials Science, Mechanical Engineering*. Dnepropetrovsk, PGASA, 4-6 [in Russian].
10. Lyasnikov, V.N., Perov, V.V., Lavrova, V.N. (1977) Application of plasma-arc spraying of alundum in manual manufacture of cathode-heating unit. *Elektronnaya Tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*, **4**, 85-87 [in Russian].

11. Baklanov, D.I., Belyajkov, I.N., Virnik, A.M. et al. (1996) *Method of manufacturing of resistive heating element*. Pat. 2066514 RF, Int. Cl. H 05 B 3/12 [in Russian].
12. Vojnarovich, S.G. (2012) Examination of shape and size of spraying spot and metalizing figure under conditions of microplasma spraying of hydroxyapatite coating. *Vestnik NUK*, **3**, 81-84 [in Russian]
13. Samsonov, G.V., Epik, L.P. (1973) *Refractory coatings*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
14. Borisov, Yu.S., Pereverzev, Yu.N., Bobrik, V.G., Vojnarovich, S.G. (1999) Deposition of narrow-band coatings by microplasma spraying method. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 53-55.
15. Kislitsa, A.N., Kuzmich-Yanchuk, E.K., Kislitsa, N.Yu. (2009) Producing of narrow bands by microplasma spraying method from Ni-Cr wire. In: *Abstr. of Papers of All-Ukrainian Sci.-Tekhn. Conf. of Young Scientists and Specialists on Welding and Related Technologies* (Kiev, 27-29 May 2009), 94.
16. GOST 1516.1-76: A.c. electric equipment for 3-500 kV voltage [in Russian].
17. Barabanova, E.V., Zaborovsky, K.M., Posadova, E.M., Kastro, R.A. (2013) Influence of porosity on electrophysical properties of PZT ceramics. *Izvestiya A.I.Gertsen GPU*, **157**, 79-83 [in Russian].
18. Zheglova, A.I. (1994) Synthesis and electrical properties of oxide ceramics for application in electronics. In: *Syn. of Thesis of Cand. of Techn. Sci. Degree*. Kiev. <http://tekhnosfera.com/sintez-i-elektricheskie-svoystva-oksidnoy-keramiki-dlya-primeneniya-v-elektronike>.

Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарлович, О. М. Кислиця,  
С. М. Калюжний, В. Ю. Глуховський

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

#### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕЗИСТИВНОГО НАГРІВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

В роботі описується отримання резистивного нагрівального елемента з багат шарових покриттів, які були нанесені на сталеву основу методом мікроплазмове напильнення. Для формування вузьких резистивних доріжок використаний  $TiO_2$  у вигляді порошку 15...40 мкм. В якості електроізоляції від сталеві основи нанесено підшар з  $Al_2O_3$  з розміром частинок –40 мкм. Проведені випробування резистивних нагрівальних елементів показали їх працездатність до температури 200 °С,

при питомій потужності 75 Вт. Підвищення температури нагріву резистивного нагрівального елемента на повітрі вище 230 °С призводить до втрати електропровідності. Основними можливими областями застосування таких резистивних нагрівальних елементів є машинобудівна, хімічна і радіоелектронна промисловості. В результаті проведеного експерименту показана принципова можливість виготовлення резистивного нагрівального елемента з резистивними доріжками з  $TiO_2$  із застосуванням технології мікроплазмове напильнення. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 5.

**Ключові слова:** електронагрівач, резистивний нагрівальний елемент, діоксид титану, мікроплазмове напильнення

Yu.S. Borisov, S.G. Voinarovich, A.N. Kislitsa,  
S.N. Kalyuzhny, V.Yu. Glukhovskii

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

#### APPLICATION OF THE METHOD OF MICROPLASMA SPRAYING FOR MANUFACTURING RESISTANCE HEATING ELEMENT

The paper provides a description of producing a resistance heating element from multilayer coatings, which were deposited on a steel base by the method of microplasma spraying.  $TiO_2$  in the form of powder with particles of 15–40  $\mu m$  size was used to deposit narrow resistive paths. A sublayer from  $Al_2O_3$  with 40  $\mu m$  particle size was deposited to provide electric insulation from the steel base. Performed testing of resistance heating elements showed their serviceability up to the temperature of 200 °C at specific power of 75 W. Increase of the temperature of resistance element heating in air above 230 °C leads to loss of electrical conductivity. The main possible areas for such resistance heating element application are mechanical engineering, chemical and radioelectronic industry. Performed experiment allowed demonstrating the fundamental possibility of manufacturing resistance heating elements with resistive paths from  $TiO_2$  with application of microplasma spraying technology. 18 Ref., 1 Tabl., 5 Ref.

**Keywords:** electric heater, resistive heating element, titanium dioxide, microplasma spraying

Поступила в редакцію 29.12.2017

## 9 Международная конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

17–19 сентября 2018 г.

г. Санкт-Петербург (г. Пушкин)

### Тематика конференции

- Физические основы и математическое моделирование лучевых технологий. CAD-CAM-CAE системы.
- Оборудование и технологии сварки, наплавки и термообработки.
- Оборудование и технологии аддитивного производства.
- Оборудование и технологии резки, прошивки отверстий и обработки поверхности.
- Метрология, системы измерений и дефектоскопия.

Официальные языки конференции: английский, русский

[www.ilwt-stu.ru](http://www.ilwt-stu.ru)

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ТОРЦОВ ЗАГОТОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСХОДУЕМОГО И НЕРАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДОВ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, П. П. ОСЕЧКОВ, В. В. ОСИН\*

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

Получение при торцевой электрошлаковой наплавке расходуемым электродом большого сечения минимального и равномерного проплавления основного металла представляет собой сложную задачу. Наиболее перспективно использовать для этих целей нерасходуемый электрод — токоподводящий кристаллизатор. Исследовали влияние различных электрических схем подключения электродов разного диаметра от одного или двух источников питания переменного тока на проплавление основного металла. Установлено, что с точки зрения получения оптимальной технологии наплавки (достижение не только качественных показателей, но и повышенной производительности процесса) перспективно использовать схему наплавки с одним источником питания и одинаковыми потенциалами на поддоне и токоведущей секции токоподводящего кристаллизатора. Схема электрошлаковой наплавки с двумя источниками позволяет получать аналогичные результаты, но более сложная по исполнению (наличие двух источников) и, соответственно, экономически менее целесообразна. Полученные результаты могут составить банк данных для построения системы автоматического регулирования проплавления основного металла при торцевой электрошлаковой наплавке. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 3.

*Ключевые слова:* торцевая электрошлаковая наплавка, расходуемый электрод большого сечения, токоподводящий кристаллизатор, источники питания переменного тока, проплавление основного металла

Предложенная сотрудниками Донецкого национального технического университета технология торцевой электрошлаковой наплавки, названная ими как объемная ЭШН, достаточно широко применяется при восстановлении различных изделий, главным образом, зубьев ковшей экскаваторов. При этом используются различные техники наплавки, а электроды могут быть как составные, так и обычные [1, 2]. В результате величина переходной зоны может не превышать 300 мкм [3, 4]. Зачастую получение небольших значений величин переходной зоны требует жестких условий ведения электрошлакового процесса. В частности, в случае, например, применения при наплавке электрошлакового обогрева при его недостаточном по времени воздействии резко возрастают глубина металлической ванны и перемешивание основного и наплавленного металлов [4]. Таким образом, качество одноэлектродной ЭШН в обычном водоохлаждаемом кристаллизаторе зависит от множества факторов, влияющих на конечный результат наплавки.

В работе [5] было показано, что требуемые характеристики биметалла можно получить при использовании нерасходуемого электрода — токоподводящего кристаллизатора (ТПК) и одного источника питания, но обеспечить стабильность

его качества от наплавки к наплавке также достаточно сложно.

Применительно к электрошлаковому переплаву (ЭШП) в ТПК для получения относительно плоской металлической ванны авторы работ [6, 7] предлагают использовать так называемую двухконтурную (два источника питания) схему ведения электрошлакового процесса. И хотя в этих работах достаточно подробно рассмотрено влияние различных параметров процесса на достижение поставленной цели, все же эти данные относятся к технологии получения слитков ЭШП. При этом остается не ясным, какое же положение торца оплавленного электрода в шлаковой ванне следует считать оптимальным. По нашему мнению, решение этой задачи является наиболее важным с точки зрения автоматизации процесса регулирования проплавления основного металла при ЭШН. Практическое же подтверждение возможностей применения двухконтурной схемы при получении сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока [8] не совсем показательным, так как величина глубины металлической ванны при плавке металла высокой теплопроводности (медь) относительно небольшая [9].

Обеспечить повторяемость показателей качества биметаллических заготовок можно за счет оптимизации как электротехнических параметров (вид применяемого тока, схемы подключения переплавляемого электрода разного диаметра, ко-

\* В экспериментах по наплавке принимал участие инж. А. И. Евдокимов.

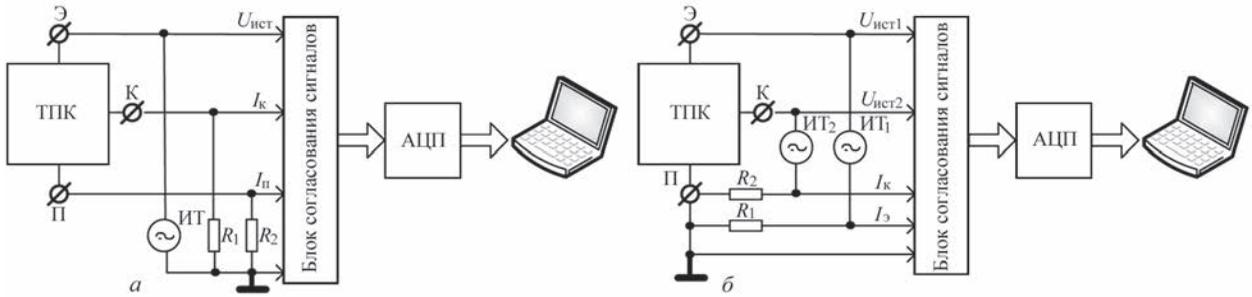


Рис. 1. Структурная схема электрических соединений для проведения экспериментов для одноконтурной (а) и двухконтурной (б) ЭШН (Э, К и П — клеммы подсоединения электрода, токоведущей секции кристаллизатора и поддона с заготовкой, соответственно; ИТ — источник переменного тока;  $R_1, R_2$  — измерительные токовые шунты;  $U_{ист1}, I_K, I_P, I_3$  — сигналы, пропорциональные напряжению источника тока, току кристаллизатора, току поддона и току электрода, соответственно; АЦП — аналого-цифровой преобразователь)

личества источников питания), так и геометрических (расположения наплавляемой поверхности относительно токоведущей секции ТПК, расположение торца плавящегося электрода относительно наплавляемой поверхности).

Данная работа является продолжением ранее начатых исследований по торцевой ЭШН электродом большого сечения в ТПК [5]. В ней рассматриваются и сравниваются различные технические решения с точки зрения экономичности процесса наплавки, простоты его осуществления и стабильности результатов качества наплавки. За изменяемые показатели приняты различные электрические схемы подключения электродов разного диаметра к одному или двум источникам питания переменного тока. Переменный ток для наплавки выбран как наиболее распространенный в электрошлаковых технологиях [10, 11]. Также предполагается полученные в результате выполнения опытных наплавки данные использовать при создании системы автоматического регулирования проплавления основного металла.

Эксперименты по наплавке, как и в работе [5], выполнялись на флюсе АНФ-29 в ТПК диаметром 180 мм электродами из стали 40 диаметром 40...130 мм. Заготовки из стали Ст.3 толщиной

20 мм закреплялись на водоохлаждаемом поддоне. Источники питания: ТШП-10 и ТШС-3000-1.

На рис. 1 представлена структурная схема электрических соединений при проведении экспериментов для одноконтурной (а) и двухконтурной (б) ЭШН. Измерение и запись токов и напряжения проводились с помощью универсального модуля АЦП Е14-440 (шина USB2), ноутбука LENOVO модель IdealPad Y560 с 64-разрядной операционной системой и программного обеспечения (ПО) «PowerGraph». Сигналы в виде напряжения, пропорциональные токам в цепях источников, снимались с помощью измерительных токовых шунтов  $R_1$  и  $R_2$ . Напряжения источников тока и сигналы токов в цепях источников вводились через блок согласования сигналов, выполняющего роль защиты от перегрузок и фильтра от высокочастотных помех, в АЦП с частотой дискретизации 1,0 кГц и вводились для обработки в компьютер. С помощью ПО «PowerGraph» рассчитывались эффективные значения вводимых сигналов переменного тока и напряжения, а затем сохранялись в памяти компьютера. На рис. 2 представлен фрагмент записи параметров процесса наплавки (эксперимент 22М).

В таблице приведены результаты экспериментов по исследованию влияния электрических параметров процесса ЭШН в ТПК (при использовании электродов разного диаметра и схем их подключения) на проплавление основного металла. По результатам экспериментов анализировались макрошлифы полученного биметалла, проводились расчеты средней глубины проплавления заготовки и средней неравномерности ее проплавления. В качестве примера на рис. 3 представлен

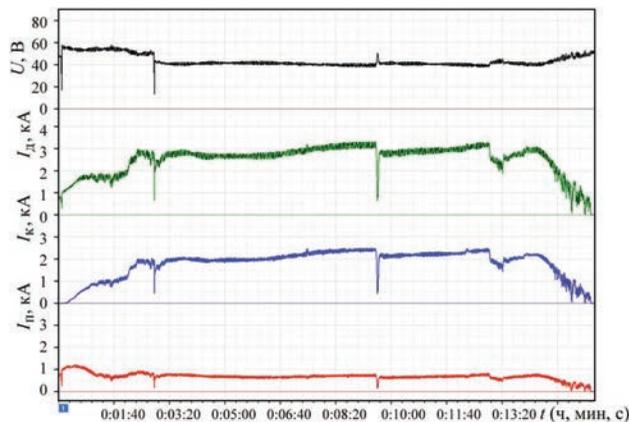


Рис. 2. Фрагмент записи параметров процесса наплавки (эксперимент 22М)



Рис. 3. Макрошлиф биметаллического образца (эксперимент 25М). Пунктирной линией обозначена зона перемешивания металлов

Показатели режимов ЭШН и оценка качества биметаллических образцов, полученных в ТПК

Номер эксперимента	Диаметр электрода, мм	Схема подключения	Ток, кА		Напряжение, В		$N_{\text{общ}}, \text{кВт}\cdot\text{А}$	$N_{\text{ТПК}}/N_{\text{эл}}$	$v_3, \text{мм/мин}$	$G, \text{кг/ч}$	$h, \text{мм}$	$Q, \text{кВт}\cdot\text{ч/кг}$	Качество наплавки		
			ТПК	Электрод	ТПК	Электрод							$H_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{ср}}$	КНП
21М	130	ОС	2,5	3	0	44	132	45/55	18	135	85	1	8	3	Хор.
22М	90	->-	2,1	2,8	0	41	115	43/57	18	50	85	2,3	7	3	Отл.
23М	40	->-	1,5	2,4	0	50	120	38/62	110	34	85	3,5	3	1	->-
25М	90	ДС	3,2	2,4	37	68	293	43/57	49	42	85	6,9	2	1	Хор.
26М	90	->-	1,2	2	42	11	72	31/69	51	10	85	7,2	4	2	->-
28М	40	->-	2,6	1,6	33	40	150	43/57	76	28	85	5,4	2	1	Отл.
29М	40	->-	2,3	1,2	32	42	124	41/59	89	24	61	5,2	15	8	Хор.

Примечание. ОС, ДС — одноконтурная и двухконтурная схема подключения ТПК, соответственно;  $N_{\text{общ}}$  — общая мощность, потребляемая ТПК;  $N_{\text{ТПК}}/N_{\text{эл}}$  — соотношение мощностей на кристаллизаторе и электроде;  $v_3$  — скорость движения электрода;  $G$  — производительность наплавки;  $h$  — расстояние от наплавляемой поверхности до верха формирующей секции;  $Q$  — удельный расход электроэнергии;  $H_{\text{ср}}$  — средняя глубина проплавления, мм;  $\Delta_{\text{ср}}$  — средняя неравномерность проплавления, мм; КНП — качество формирования наплавляемой поверхности (экспертная оценка).

макрошлиф биметаллического образца (эксперимент 25М). Пунктирной линией обозначена зона перемешивания металлов.

Средняя глубина проплавления  $H_{\text{ср}}$  определялась как  $H_{\text{ср}} = S_{\text{в}}/D_3$ , где  $S_{\text{в}}$  — площадь поверхности макрошлифа между верхним уровнем изделия и линией проплавления изделия;  $D_3$  — диаметр заготовки. Средняя неравномерность проплавления заготовки  $\Delta_{\text{пр}}$  определялась как  $\Delta_{\text{пр}} = S_{\Delta}/D_3$ , где  $S_{\Delta}$  — площадь поверхности макрошлифа, ограниченной линией  $H_{\text{ср}}$  и линией проплавления изделия. Качество формирования наплавляемой поверхности (КНП) оценивалось тремя экспертами.

Полученные данные подтверждают то, что ЭШН с использованием одноконтурной схемы питания с одинаковыми потенциалами на поддоне и токоведущей секции ТПК (эксперименты 21М, 22М и 23М) обеспечивают более высокую производительность, чем двухконтурная схема ЭШН с общей точкой подключения источников питания на поддоне (эксперименты 25М, 26М, 28М и 29М). Это связано, очевидно, с тем, что при наплавке доля тока, идущего через электрод, в первом случае гораздо выше, чем во втором. В связи с этим, вызывает интерес исследование ЭШН по двухконтурной схеме с общей точкой подключения источников питания на электроде, имеющей, предположительно, более высокую производительность, чем схема с общей точкой подключения на поддоне. Следует отметить, что двухконтурная схема ЭШН с общей точкой подключения обоих источников питания на поддоне является традиционной схемой использования двух источников питания при ЭШП в ТПК [6–8].

Для всех экспериментов, включая и ЭШН по двухконтурным схемам, обеспечивалось практически одинаковое соотношение мощностей  $N_{\text{ТПК}}/N_3$  (31...45)/(55...69). В данных экспериментах не использовалась ЭШН по двухконтурной схеме с соотношением мощностей в пользу кристалли-

затора, также как в [6–8]. Так как в этом случае, по-нашему мнению, уменьшается доля мощности на электроде в процессе наплавки, и ЭШН по двухконтурной схеме приведет к еще большему уменьшению производительности наплавки из-за снижения скорости плавления электрода.

Эксперименты показали, что ЭШН по одноконтурной схеме с использованием электрода диаметром 40 мм (эксперимент 23М) может конкурировать по таким параметрам, как  $H_{\text{ср}}$  и  $\Delta_{\text{пр}}$  с ЭШН по двухконтурной схеме (эксперимент 28М). Уменьшение расстояния от наплавляемой поверхности до верха формирующей секции с 85 до 61 мм (эксперименты 28М и 29М) привело к значительному увеличению средней глубины проплавления (с 2 до 15 мм) и средней неравномерности проплавления (с 1 до 8 мм). Вероятно, это связано с увеличением степени воздействия горячего расплавленного металла на заготовку. Изменение диаметра электрода от 130 до 40 мм привело к уменьшению как  $H_{\text{ср}}$ , так и  $\Delta_{\text{пр}}$ .

### Выводы

1. Установлена возможность выполнения торцевых ЭШН при различных электрических схемах подключения электродов разного диаметра от одного или двух источников питания переменного тока и исследовано влияние электрических и технологических параметров на проплавление основного металла.

2. Показано, что с точки зрения получения оптимальной технологии наплавки (достижение не только качественных показателей, но и повышенной производительности процесса) можно считать схему наплавки с одним источником питания и одинаковыми потенциалами на поддоне и токоведущей секции ТПК (нерасходуемый электрод) перспективной.

3. Схема ЭШН с двумя источниками позволяет получать аналогичные, как и у ЭШН с одним источником, результаты, но более сложная по ис-

полнению (наличие двух источников), характеризуется меньшей производительностью и, соответственно, экономически менее целесообразна.

4. Представляется перспективным исследование ЭШН по двухконтурной схеме питания с общей точкой подключения обоих источников на электроде, имеющей, предположительно, более высокую производительность, чем схема с общей точкой подключения на поддоне.

5. Полученные результаты могут составить банк данных для построения системы автоматического регулирования проплавления основного металла при торцевой ЭШН.

### Список литературы

1. Шварцер А. Я., Дорохов В. В., Пономаренко В. П. (1982) Развитие способов электрошлаковой наплавки зубьев ковшей экскаваторов. *Современные способы наплавки и их применение*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 70–77.
2. Киселева И. В., Дорохов В. В., Шварцер А. Я., Герасимов Е. А. (1989) Использование электрошлакового обогрева при упрочнительно-восстановительной наплавке зубьев ковшей экскаваторов. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 28–30.
3. Пономаренко В. П., Шварцер А. Я., Строганова Г. В. (1985) Исследование зоны сплавления высокохромистого чугуна с высокомарганцевой сталью при электрошлаковой наплавке. *Металловедение и терм. обработка металлов*, **11**, 55–58.
4. Киселева И. В., Дорохов В. В., Шварцер А. Я., Герасимов Е. А. (1989) Регулирование протяженности переходной зоны методом электрошлакового обогрева. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 15–19.
5. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А. (2017) Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **12**, 40–45.
6. Цыкуленко А. К., Ланцман И. А., Медовар Л. Б. и др. (2000) Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходующего электрода. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 16–20.
7. Медовар Л. Б., Цыкуленко А. К., Чернец А. В. и др. (2000) Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШН на размеры и форму металлической ванны. *Там же*, **4**, 3–7.
8. Зайцев В. А., Медовар Л. Б., Тищенко П. И. и др. (2011) Применение ЭШН по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока. *Современная электрометаллургия*, **2**, 3–7.
9. (1986) Патон Б. Е. и Медовар Б. И. (ред.) *Металлургия электрошлакового процесса*. Киев, Наукова думка.
10. (1976) Патон Б. Е. и Медовар Б. И. (ред.) *Электрошлаковые печи*. Киев, Наукова думка.
11. (1980) Патон Б. Е. (ред.) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Москва, Машиностроение.
12. iron with high-manganese steel in electroslag surfacing. *Metallovedenie i Term. Obrabotka Metallov*, **11**, 55-58 [in Russian].
13. Kiseleva, I.V., Dorokhov, V.V., Shvartser, A.Ya., Gerasimov, E.A. (1989) Regulation of extension of transition zone by electroslag heating method. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 15-19 [in Russian].
14. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Zhdanov, V.A. (2017) Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **12**, 29-32.
15. Tsykulenko, A.K., Lantsman, I.A., Medovar, L.B. et al. (2000) Two-circuit electroslag remelting of consumable electrode. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 16-20 [in Russian].
16. Medovar, L.B., Tsykulenko, A.K., Chernets, A.V. et al. (2000) Examination of influence of two-circuit ESR parameters on sizes and shape of metal pool. *Ibid.*, **4**, 3-7 [in Russian].
17. Zajtsev, V.A., Medovar, L.B., Tishchenko, P.I. et al. (2011) Application of two-circuit ESR for producing of steel-copper anode billets of d.c. arc furnaces. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 3-7 [in Russian].
18. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
19. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
20. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловйов, П. П. Осечков, В. В. Осін

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

### ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ТОРЦІВ ЗАГОТОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ВИТРАТНОГО ТА НЕВИТРАТНОГО ЕЛЕКТРОДІВ

Отримання при торцевому електрошлаковому наплавленні витратним електродом великого перерізу мінімального та рівномірного проплавлення основного металу являє собою складну задачу. Найбільш перспективно використовувати для цих цілей невитратний електрод — струмопідвідний кристалізатор. Досліджували вплив різних електричних схем підключення електродів різного діаметра від одного або двох джерел живлення змінного струму на проплавлення основного металу. Встановлено, що з точки зору отримання оптимальної технології наплавлення (досягнення не тільки якісних показників, а й підвищеної продуктивності процесу) перспективно використовувати схему наплавлення з одним джерелом живлення і однаковими потенціалами на піддоні і струмопровідній секції струмопідвідного кристалізатора. Схема електрошлакового наплавлення з двома джерелами дозволяє отримувати аналогічні результати, але більш складна по виконанню (наявність двох джерел) і, відповідно, економічно менш доцільна. Отримані результати можуть скласти банк даних для побудови системи автоматичного регулювання проплавлення основного металу при торцевій електрошлаковій наплавці. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 3.

*Ключові слова:* торцева електрошлакова наплавка, витратний електрод великого перерізу, струмопідвідний кристалізатор, джерела живлення змінного струму, проплавлення основного металу

### References

1. Shvartser, A.Ya., Dorokhov, V.V., Ponomarenko, V.P. (1982) Development of electroslag surfacing method of excavator bucket teeth. *In: Modern methods of surfacing and their application*. Kiev, PWI, 70-77 [in Russian].
2. Kiseleva, I.V., Dorokhov, V.V., Shvartser, A.Ya., Gerasimov, E.A. (1989) Application of electroslag heating in hardening-restoration surfacing of excavator bucket teeth. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 28-30 [in Russian].
3. Ponomarenko, V.P., Shvartser, A.Ya., Stroganova, G.V. (1985) Examination of fusion zone of high-chromium cast

Yu.M. Kuskov, V.G. Solovjov, P.P. Osechkov, V.V. Osin\*

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

ELECTROSLAG SURFACING OF BILLET  
END FACES WITH APPLICATION OF CONSUMABLE  
AND NONCONSUMABLE ELECTRODES

Producing minimum and uniform penetration of base metal at electroslag surfacing of end faces by consumable electrode of a large cross-section is a complex task. The most promising is the application of nonconsumable electrode — current-supplying mould for these purposes. Influence of different electric circuits of connection of electrodes of different diameter from one or

two A.C. power sources on base metal penetration was studied. It is found that from the viewpoint of optimizing the surfacing technology (not only achievement of quality indices, but also increased process efficiency), it is promising to apply the surfacing circuit with one power source and the same potentials on the tray and current-conducting section of the current-supplying mould. Circuit of electroslag surfacing with two sources allows producing similar results, but it is more complicated to implement (presence of two sources) and less cost-effective, respectively. Obtained results can make up the data bank for designing a system of automatic regulation of base metal penetration at electroslag surfacing of end faces. 11 Ref., 1 Tabl, 3 Fig.

*Keywords:* electroslag surfacing of end faces, large cross-section consumable electrode, current-supplying mould, A.C. power sources, base metal penetration

Поступила в редакцию 15.11.2017

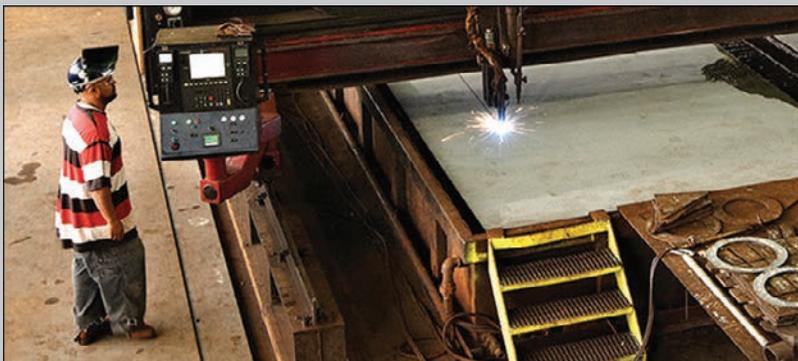


## Hypertherm — 50 лет инноваций в области промышленной резки

Компания Hypertherm, производитель промышленных систем и программного обеспечения для резки, отметила свой 50-й год инноваций в области промышленной резки, внедряя новые программы, призванные повысить качество работ.

С момента своего основания в 1968 г. Диком Коучем, компания Hypertherm работала над удовлетворением потребностей клиентов, постоянно предлагая инновации, направленные на повышение производительности и рентабельности.

«Акцент Hypertherm всегда заключался в том, чтобы помочь нашим клиентам снизить эксплуатационные расходы и повысить производительность резки, чтобы они могли достичь роста своей прибыльности. Это то, что мы продолжаем делать и сегодня. В партнерстве с нашими клиентами мы помогаем им выбрать правильное решение для достижения своих бизнес-целей», — сказал президент и главный исполнительный директор Hypertherm Эван Смит.



Г-н Коуч и проф. Боб Дин, работая в гараже, обнаружили, что радиальный ввод воды в плазменное режущее сопло обеспечивает более узкую дугу, позволяющую более точно и быстро резать металл, практически исключая тяжелые шлаки и двойные газы, искрение. Сегодня системы для резки Hypertherm используются при строительстве кораблей, поездов, землеройного оборудования, зданий, стадионов, мостов и т. п.

Благодаря значительным инвестициям в исследования и разработки, инженеры компании продвигают на рынок многочисленные революционные технологии. Они включают процессы HyDefinition<sup>®</sup>, HyPerformance<sup>®</sup> и, в последнее время, плазменные процессы X-Definition<sup>™</sup>.

Hypertherm разрабатывает и производит промышленные изделия, используемые в различных отраслях промышленности. Его линейка продуктов включает системы резки, роботизированное программное обеспечение и расходные материалы. Системы Hypertherm отличаются высокой производительностью и надежностью, что приводит к повышению рентабельности для сотен тысяч предприятий.

В компании Hypertherm со 100-процентным ассоциированным капиталом работает более 1400 сотрудников. Она имеет представительства во многих странах и множество партнеров по всему миру.

## НАШІ ВІТАННЯ



*Колектив Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Автоматическая сварка» вітають директора державного підприємства «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України» Петра Олексійовича Косенка з високою державною нагородою.*

## УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 11/2018

Про відзначення державними нагородами України з нагоди Дня Соборності України  
За значний особистий внесок у державне будівництво, соціально-економічний, науково-технічний, культурно-освітній розвиток Української держави, вагомі трудові досягнення, багаторічну сумлінну працю

### ПОСТАНОВЛЯЮ

Нагородити орденом «За заслуги» I ступеня КОСЕНКА Петра Олексійовича — директора державного підприємства «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України», м. Київ.

## ПОДГОТОВКА СПЕЦІАЛІСТІВ ДЛЯ КНР

Осенью 2017 г. преподаватели сварочного факультета НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» провели занятия с двумя группами специалистов-производственников из КНР по методике «Tailored Education».

«Tailored Education» популярно в современном мире как один из видов обучения (наряду с дистанционным и модульным обучением). В любом случае идея остается неизменной — заказчик сам определяет тематику, объем, темп, форму и продолжительность учебы. Такой подход позволяет компаниям-заказчикам осуществлять повышение квалификации своих сотрудников с максимальной эффективностью.

Именно такое предложение поступило коллективу сварочного факультета от группы компаний из КНР, работающих в области авиастроения. Они высказали пожелание ознакомить своих технических специалистов с современными технологиями сварки и родственных процессов. Прежде всего такими, которые используются ведущими производителями авиатехники сегодня. Компании при



этом представили желание программы обучения для двух групп.

Коллектив преподавателей факультета справился с нелегким заданием — обе группы просили стажировку прошедшей осенью.

Преподаватели сварочного факультета выразили коллегам из факультета авиационных и космических систем КПИ благодарность за возможность участия в таком непросто, но интересном образовательном проекте.

Пост-релиз сварочного факультета

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС СТУДЕНЧЕСКИХ РАБОТ

26–27 декабря 2017 г. на базе кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» (ОТСП) Донецкой государственной машиностроительной академии (ДГМА) (г. Краматорск, Донецкая обл.) и Новокраматорского машиностроительного завода (НКМЗ) был проведен V Международный конкурс магистерских дипломных проектов, дипломных работ и магистерских диссертаций студентов высших учебных заведений по направлению подготовки «Сварка». На конкурсе были представлены студенческие работы из вузов Украины и Беларуси.

В состав жюри вошли: заместитель главного сварщика по науке и научно-исследовательской работе ЧАО «НКМЗ» А. Е. Мерзляков (сопредседатель), заведующая кафедрой ОТСП, д-р техн. наук Н. А. Макаренко (сопредседатель), а в качестве членов жюри — ведущие специалисты и главные профильные специалисты ведущих предприятий региона.

В конкурсе приняли участие 35 магистерских проектов, дипломных работ и магистерских диссертаций в трех секциях: 1. «Технологии и оборудование сварки»; 2. «Сварочные установки»; 3. «Восстановление и повышение износостойкости деталей и конструкций».

Победителями конкурса стали:

### Секция 1.

I-е место разделили — магистрант Рига Андрей Владимирович (Ивано-Франковский НТУ нефти и газа), научный руководитель д-р техн. наук Шлапак Л. С. Тема работы: «Исследование межкристаллитной коррозии сварных соединений разнородных сталей»;

— магистрант Бузовир Андрей Владимирович (ДГМА), научный руководитель д-р техн. наук Макаренко Н. А. Тема работы: «Усовершенствование наплавленного металла и технологии его нанесения для изготовления и восстановления режущего инструмента».

II-е место — магистрант Вершинин Максим Андреевич (Днепропетровский ГТУ, г. Каменское), научный руководитель д-р техн. наук Перемитько В. В. Тема работы: «Исследование свойств композиционных слоев, наплавленных с добавлением внешних влияний».

### Секция 2.

I-е место разделили:

— магистрант Подойницин Дмитрий Вадимович (Белорусско-Российский университет, г. Могилев), научный руководитель д-р техн. наук Куликов В. П. Тема работы: «Исследование технологических характеристик процесса дуговой сварки с двухструйной подачей защитных газов»;

— магистрант Завадский Николай Валерьевич (Приазовский ГТУ, г. Мариуполь), научный руководитель д-р техн. наук Матвиенко В. М. Тема работы: «Усовершенствование технологий сварки балки хребтовой сталевого грузоподъемностью 250 т и исследование влияния кислорода в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на некоторые характеристики металла шва».

II-е место — магистрант Михайленко Олег Андреевич (НТУУ «КПИ» им. Игоря Сикорского, г. Киев), научный руководитель доцент Коваленко В. А. Тема работы: «Разработка технологических рекомендаций для перехода на современные промышленные смеси газов при электродуговой сварке плавящимся электродом и усовершенствование методики расчета параметров режима сварки».

По решению жюри конкурса 3-е место в I-й и 2-й секциях не назначалось.

### Секция 3.

I-е место — магистрант Попадюк Алексей Михайлович (Винницкий НТУ), научный руководитель доцент Шилина Е. Н. Тема работы: «Технологические приемы повышения качества восстановления рабочих поверхностей опорного катка танка Т-72».

II-е место — магистрант Мозола Нестор Зиновьевич (НУ «Львовская политехника»), научный руководитель д-р техн. наук Похмурская А. В. Тема работы: «Повышение износостойкости наплавленных слоев базовой системы Fe–Cr–В».

III-е место — магистрант Густера Роман Николаевич (Запорожский НТУ), научный руководитель доцент Андрущенко М. И. Тема работы: «Разработка и исследование технологии упрочнения и восстановления штамподержателей прессформ для производства силикатных кирпичей».

Кроме того, по решению конкурсной комиссии были отмечены поощрительными грамотами ДГМА ряд других работ.

**За оригинальное решение научно-технологической проблемы:** магистрант Акрытова Таисия Александровна (Запорожский НТУ), научный руководитель ст. преподаватель Капустян А. Е.



Тема работы: «Исследование механических и служебных свойств сварных соединений спеченых титановых сплавов с проектированием участка».

**За разработку новейших экспериментальных методик:**

– магистрант Игнатов Валентин Александрович (Белорусско-Российский университет), научный руководитель доцент Болотов С. В. Тема работы: «Разработка и исследование информационно-измерительной системы для сертификации испытаний оборудования для дуговой сварки».

По окончании конкурса ее организаторы выразили благодарность руководству ЧАО «НКМЗ» в лице главного инженера А. И. Волошина, главному сварщику В. А. Беликскому и зам. главного сварщика А. Е. Мерзлякову за вклад в обеспечение хороших условий проведения конкурса и выразили надежду на дальнейшее сотрудничество при подготовке специалистов и проведении подобных конкурсов.

Н. А. Макаренко

## В МЕЖДУНАРОДНОМ ИНСТИТУТЕ СВАРКИ

С 15 по 19 января 2018 г. в Париже проходил промежуточный съезд Международного института сварки. В его работе приняли участие около 200 делегатов из 50 стран — членов МИС. Программа включала рабочие собрания групп и комиссий, входящих в состав института. Также состоялось очередное заседание редколлегии журнала «Welding in the World». Были проведены совещания руководящих советов Международного комитета по аккредитации (IIW/EFW-IAB) и Комитета технического управления (IIW-TMB). В роли принимающей организации традиционно выступил Институт сварки Франции.

Основное время было отведено работе Международного комитета по аккредитации. Его основная деятельность связана с разработкой, внедрением и совершенствованием программ обучения и аттестации сварочного персонала разных уровней, а также процедурами сертификации персонала и производства. Активное участие в его работе принимают представители учебных и аттестационных заведений, а также центров по сертифика-



ции из разных стран. В рамках работы комитета прошли заседания рабочих групп А «Образование, обучение и квалификация» и В «Внедрение и аккредитация», в ходе которых обсуждались вопросы пересмотра программ подготовки персонала различных уровней, требований к кандидатам на обучение и преподавателям. Также были



заслушаны результаты проверок, проведенных за последние полгода командой аудиторов под руководством Т. Джессопа (Великобритания). В ходе заседания рабочей группы В Уполномоченному органу по аттестации персонала в Украине — ДП МУАЦ ИЭС им. Е. О. Патона — были вручены лицензии Международного института сварки и Европейской федерации сварки на последующие 5 лет.

Состояние собрание, посвященное особенностям работы гармонизированной базы — интернет-ресурса с наборами вопросов для проведения письменных экзаменов. На сегодня использование базы обязательно только для аттестации Международных сварщиков и координаторов сварочных работ, однако в дальнейшем планируется проведение таких экзаменов для всех категорий персонала. Это обеспечит гармонизацию не только учебного процесса, но и самой процедуры аттестации. Требования к наборам вопросов зафиксированы в руководящих документах МИС и учитывают не только длительность экзамена и указанные в учебной программе ожидаемые результаты, но и соотношение учебных часов по тому или иному разделу с количеством и уровнем сложности относящихся к нему вопросов. В настоящее время идут работы по гармонизации не только теоретической части экзамена, но и практической. Так, к примеру, разрабо-

таны и в ближайшее время будут изготовлены пластиковые образцы для инспекторов. В разработке и отладке базы принимают активное участие представители Украины, что неоднократно было отмечено руководителями рабочих групп.

Наиболее весомым результатом работы групп, имеющих отношение к обучению персонала, стало завершение проекта ManuMobile, направленного на гармонизацию программ обучения Международных инженеров, технологов и специалистов по сварке с Европейским уровнем квалификаций. Теперь все разделы программы имеют эквивалент в кредитах ECTS, что позволит частично внедрять ее в учебных заведениях.

Летом 2010 г. в ходе 63-й Ежегодной ассамблеи Международного института сварки было предложено создать Общее собрание членов Международного комитета как орган по аккредитации с целью усиления роли национальных делегаций в его деятельности, вплоть до выборов членов руководящего совета. Очередное заседание Общего собрания было проведено в ходе январского съезда МИС. В 2018 г. на собрании присутствовал президент Международного института сварки Д. Луциано. Он выступил с презентацией новой стратегии развития Международного института и возможного вклада его в разработку организаций — членов МИС.

16 - 18 October 2018

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

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

ExpoWELDING  
IWS

International Welding Fair

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

**МАК** Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Sosnowiec, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Статья, посвященная выставке «ExpoWELDING 2016» и участию в ней украинских компаний на коллективном стенде опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.

## ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ

Одной из основных проблем при подводной дуговой сварке является низкий уровень пластичности сварного соединения низколегированной стали вследствие экстремальных условий протекания процесса (Ibarra S., Grabbs C, Olson D. (1988) *Fundamental approaches to underwater welding metallurgy. Journal of Metals. №12. p. 8-10*). Повышения пластичности металла шва можно достичь за счет изменения его микроструктуры путем дополнительного легирования. Концептуальной основой при создании новой порошковой проволоки послужил опыт проведения успешных экспериментов с микролегированием металла шва титаном и бором при сварке на воздухе (Olson D. (1990) *The Influence of Boron and Titanium on Low Carbon Steel Weld Metal. Welding Journal. №4. p.151-158*).

При подводной сварке основными структурными составляющими в металле шва являются зернограничный феррит и феррит со второй фазой, характеризующиеся низкими пластическими свойствами. Поэтому для повышения уровня пластических свойств необходимо уменьшить их долю в металле шва за счет увеличения доли игольчатого феррита (ИФ).

В условиях ручной мокрой подводной сварки максимально достижимое количество ИФ (около 60 %) образуется при легировании металла шва 0,03 % Ti и 0,0015 % B (Sanchez-Osio A., Liu S., Olson D., Ibarra S. (1993) *Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications. Proc. 12th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. V.3. Part A. p. 119-128*). Близкие результаты в условиях сварки под водой были получены и при использовании порошковой проволоки. Экспериментально обнаружены две области с максимальным количеством ИФ на уровне 56...57 %. При этом содержание титана и бора в металле шва для первой области составляет 0,023...0,027 и 0...0,0002 %, а для второй — 0,03...0,032 и 0,0016...0,0023 %, соответственно (Максимов С., Кражановский Д. (2006) *Содержание игольчатого феррита в металле швов при подводной сварке. Автоматическая сварка. №1. с. 62-64*). Титан вводился с целью образования включений, которые служат зародышами для образования ИФ. Также титан выполняет роль раскислителя и защищает от выгорания бор и другие легирующие элементы. Бор также способствует образованию включений, которые в основном накапливаются по границам зерен аустенита и затрудняют образование доэвтектоидных фаз (зернограничного феррита).

В ходе исследований была изготовлена партия порошковых проволок на базе порошковой самозащитной проволоки для подводной сварки рутил-руднокислого типа ППС-АН1 диаметром 1,6 мм. В шихту проволоки вводили добавки FeTi и FeB за счет уменьшения количества железного порошка. Сварку стыковых соединений из Ст3 толщиной 12 мм выполняли за 7...9 проходов в стационарных условиях в лабораторном бассейне на глубине 1 м. При сварке использовали следующие параметры режима:  $U_{д} = 30...32$  В,  $I_{св} = 130...150$  А, полярность обратная. Из сваренных стыков вырезали образцы для механических испытаний, а также шлифы для металлографических исследований и определения химического состава металла шва. После выполнения полиномиальной интерполяции экспериментальных данных было установлено распределение значений относительного удлинения и временного сопротивления на разрыв в зависимости от содержания бора и титана в сварном шве. Из контурной карты распределения (рис. 1) видно, что наибольшее значение пластичности достигается при содержании в сварном шве, мас. %: 0,005...0,01 Ti и 0,0015...0,0025 B.

Структура металла шва, выполненного проволокой ППС-АН1 без легирования титаном и бором представляет собой ферритную матрицу с мелкими карбидами (рис. 2). Микротвердость металла последнего валика составляет HV1 — 1880...2130 МПа. При введении бора количество карбидов уменьшается, что приводит к снижению микротвердости до HV1 — 1750...1870 МПа. Структура металла шва — ферритно-карбидная смесь (рис. 3).

При легировании титаном структура представляет собой феррит различных модификаций: с

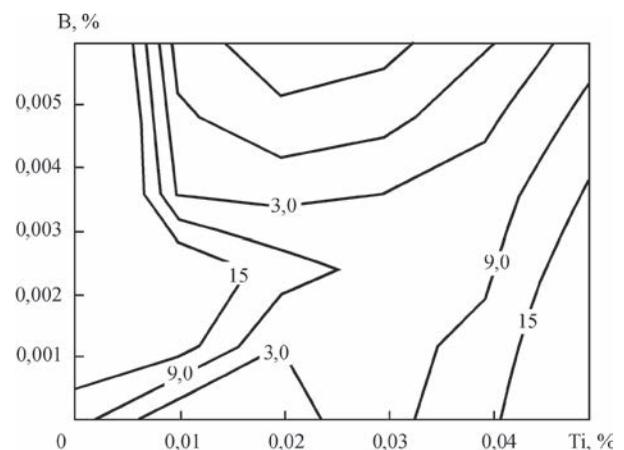


Рис. 1. Зависимость величины относительного удлинения металла шва от содержания в нем титана и бора

Рис. 2. Микроструктура ( $\times 500$ ) нелегированного металлаРис. 3. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва при легировании боромРис. 4. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва при легировании титаном

упорядоченной и неупорядоченной второй фазой, полигональным ферритом и небольшим количеством участков с игольчатым ферритом и бейнитом (рис. 4). Микротвердость металла составляет  $HV1$  — 2060...2850 МПа. С увеличением массовой доли титана выделения полигонального феррита становятся крупнее, а игольчатый феррит исчезает. При совместном введении в шихту порошковой проволоки титана и бора в металле шва наблюдается в основном феррит с неупорядоченной второй фазой, реже — с упорядоченной, а также небольшие участки игольчатого феррита (рис. 5). Микротвердость изменяется в пределах  $HV1$  — 2060... 2620 МПа.

Пользуясь графиком зависимости пластичности металла шва от содержания в нем титана и бора (рис. 1), с целью оптимизации содержания титана и бора в сварном шве была изготовлена партия самозащитных порошковых проволок. По результатам испытаний механических свойств установлено, что при содержании в металле шва

Рис. 5. Микроструктура ( $\times 200$ ) металла шва с повышенными механическими свойствами

0,003 % Ti и 0,002 % B относительное удлинение достигает 20,8%, причем прочность остается на достаточно высоком уровне — 469 МПа, а угол загиба составляет  $180^\circ$ . В целом, механические свойства металла шва соответствуют требованиям класса А Спецификации подводной сварки ANSI/AWS.D3.6.

Структура металла шва состоит из полигонального (расположенного вдоль зерен кристаллизации), видманштеттового феррита, а также пластинчатого феррита с неупорядоченной второй фазой. Данный факт имел место и в предыдущих экспериментах. Игольчатого феррита в металле шва не обнаружено. Микротвердость металла в корне шва составляет  $HV1$  — 1810...2210 МПа. В металле шва обнаружено большое количество мелких неметаллических включений (в основном оксиды и силикаты), а также небольшое количество крупных сложных оксидов (рис. 5). На границах между валиками имеются единичные поры. Трещин в шве не обнаружено.

Структура последнего валика подобна структуре валика в корне шва. Отличается несколько большим количеством пластинчатого феррита с упорядоченной второй фазой. Твердость металла последнего валика  $HV1$  — 1990...2220 МПа. Игольчатого феррита в структуре последнего валика не наблюдается.

Сварка стыкового соединения на глубине 10 и 20 м дала положительный результат в виде удовлетворительного формирования валика, отсутствия пор, трещин, шлаковых включений в металле шва.

Полученные результаты подтверждают эффективность микролегирования титаном и бором в условиях сварки под водой при решении задачи повышения пластических свойств металла шва. Однако область оптимальных механических свойств металла шва не совпадает с областью содержаний титана и бора, обеспечивающих максимальное количество игольчатого феррита в сварном шве.

С. Ю. Максимов, В. В. Мачуляк

## Компания Fronius — новатор внедрения цифровых и коммуникационных технологий\*

Индустрия 4.0 несет с собой революционные изменения производственных процессов, и сварочные технологии не станут исключением. Для оптимальной интеграции сварочных систем в заводы будущего, где все оборудование связано воедино по сети и управляется компьютером, требуются новые функции и возможности. Для компании Fronius «четвертая индустриальная революция» давно уже является реальностью: еще в 1997 г. компания разработала первый в мире цифровой источник питания и с тех пор лидирует в области внедрения цифровых и коммуникационных технологий в сварочное оборудование. Компания Fronius предлагает широкий ассортимент систем, которые повышают гибкость, интуитивность и производительность работы.

Индустрия 4.0 означает широкомасштабное внедрение цифровых и коммуникационных технологий, обеспечивающих связь и возможность обмена информацией не только между работниками, но и между установками, производственными линиями, компонентами, исходными продуктами и готовыми изделиями по всему миру. Все необходимые данные о продуктах и производственных процессах должны существовать в цифровой форме и быть доступными на всех рабочих местах. Сварочное оборудование играет важную роль, будучи ключевым компонентом многих производственных цепочек. Поэтому производители источников питания фокусируются на новых целях: на протяжении десятилетий ключом к успеху было преобразование электрической энергии, а сейчас от них требуется внедрение цифровых технологий в процесс сварки. В будущем главными направлениями исследовательских и конструкторских работ станут коммуникации, контроль данных в реальном времени и их хранение, кибербезопасность и интеллектуальные интерфейсы «человек-машина». К примеру, более важную роль станут играть программные средства для оптимизации параметров сварки или контроля над изнашивающимися деталями. Оборудование не будет иметь столь важного значения, однако бесперебойное функционирование останется ключевым требованием.

Для компании Fronius цифровое преобразование является неотъемлемым компонентом корпоративной стратегии. Двадцать лет назад международный лидер в области сварочных технологий — компания Fronius выпустила свой первый полностью цифровой источник питания TransPuls Synergic (TPS), и всего через несколько лет начала разработку следующего поколения таких устройств. Устройства серии TPS/i, которая была представлена в 2013 г., оснащены высокопроизводительным процессором и скоростной шиной для передачи больших объемов данных на более высоких скоростях, что является ключевым требованием Индустрии 4.0. Новые разработки подразделения Fronius, такие как Perfect Welding также связаны с коммуникациями и цифровыми технологиями и направлены на то, чтобы сделать производственные процессы более гибкими и экономичными.

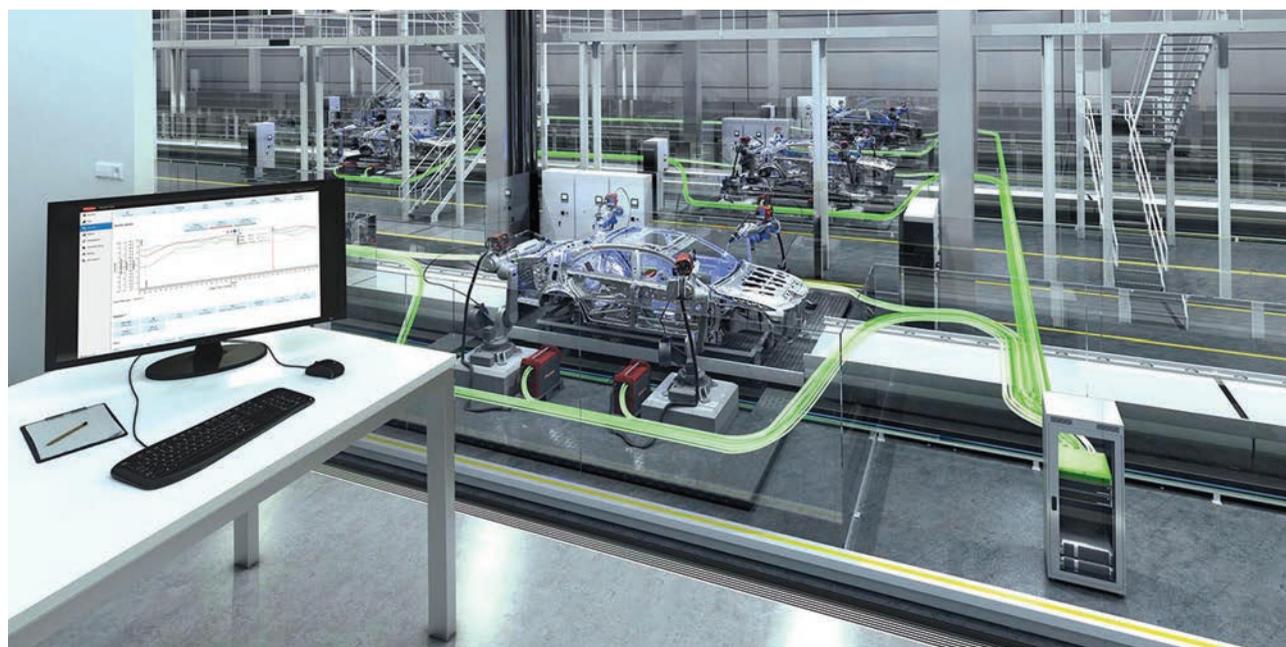


Рис. 1. WeldCube — система документирования и анализа данных от Fronius, позволяет непрерывно и точно отслеживать качество работы для 50 источников питания

\* Статья на правах рекламы.

Обработка и анализ данных это неотъемлемая часть сварочного производства. Современные сварочные системы собирают информацию о силе тока, напряжении, скорости подачи проволоки, скорости и продолжительности сварки, коррекции параметров дуги и их динамики, а также количестве сварочных заданий. Эти данные позволяют оптимизировать процессы сварки и избежать ошибок. Пользователи также могут без проблем интегрировать сварочные системы в автоматизированные производственные линии, где все оборудование объединено в сеть. Ведь только при наличии полных и понятных данных становится возможной целевая оптимизация. Для этого компания Fronius разработала WeldCube (рис. 1) — систему документирования и анализа данных сварочных процессов. WeldCube собирает наиболее важную информацию о сварочных процессах и позволяет представить ее в наглядной форме. С 2018 г. система также доступна в варианте для установки на оборудовании заказчика, иными словами, в виде чисто программного решения.

Система WeldCube предлагает множество функций, что делает ее действительно универсальным программным средством. Фактические значения параметров каждого источника питания для каждого шва можно регистрировать как глобально, так и локально, на уровне конкретного устройства. Можно осуществлять непрерывный мониторинг и анализ этих данных. Решение также способно отслеживать и регистрировать заданные значения, например, данные сварочных заданий, на протяжении всего срока службы сварочной системы. В сочетании с новой сварочной платформой Fronius TPS/i система WeldCube дает возможность централизованно создавать, изменять и сравнивать сварочные задания. Все эти данные можно экспортировать в файлы различных форматов или распечатывать. Интеллектуальные функции статистики и фильтрации позволяют выполнять анализ по уникальным параметрам. Такой анализ выполняется с учетом конкретных требований пользователя, а его результат можно легко перенести на информационную панель с отрегулированными настройками. Система WeldCube позволяет отслеживать до 50 источников питания в каждой сети. Результаты анализа можно просматривать на компьютере, планшете или смартфоне. Благодаря этим преимуществам система WeldCube способствует организации высококачественных производственных процессов, помогая значительно повысить эффективность и снизить издержки.



Рис. 2. Тренажер Virtual Welding позволяет ученикам отрабатывать навыки различных процессов сварки в виртуальных и при этом реалистичных условиях без риска получения травмы и расхода дорогостоящих материалов

Компания Fronius внедряет новые технологии также и в процесс обучения сварщиков. Для того, чтобы обучение было более простым и увлекательным, компания Fronius предлагает решения на платформе Virtual Welducation, которые позволяют познакомиться с миром сварки в виртуальной среде. Центральным элементом этого подхода является тренажер Virtual Welding (рис. 2), на котором ученики могут отрабатывать навыки ручной и роботизированной сварки в виртуальных и при этом реалистичных условиях без риска получения травмы и расхода дорогостоящих материалов. Ученик кладет деталь на компьютерный терминал, оснащенный экраном и полкой, и выполняет виртуальный сварной шов при помощи горелки, которую по конструкции и функциям почти нельзя отличить от настоящей. При этом шов отображается на экране в виде графического изображения. Очки виртуальной реальности обеспечивают ученикам реалистичное представление их работы. Для тренажера Virtual Welding можно дополнительно заказать сварочный шлем со встроенными очками виртуальной реальности. Тренажер оснащен простым в использовании и интуитивно понятным сенсорным дисплеем. Выполнять упражнения ученикам помогает Ghost — виртуальный инструктор, дающий ценные советы и подсказки. По результатам обучения выставляются баллы. Объективная оценка обеспечивает прозрачность процесса и повышает мотивацию. Ученики также могут регистрировать личные достижения и полученные навыки в цифровом виде и сохранять их в системе. Это позволяет согласовать упражнения с уровнем знаний ученика.

Тренажер Virtual Welding уже снискал огромную популярность в профессиональных училищах, центрах профессионального обучения, технических колледжах, сварочных институтах и ассоциациях. Для поддержки виртуального обучения компания Fronius разработала приложение Virtual Welducation Basic, чтобы ученики могли узнавать полезные факты обо всех аспектах сварки со смартфона или планшета и получать информацию о продуктах в интерактивном виде. Программа предлагает увлекательный подход к изучению материала — с играми и викторинами, и включает приложение дополненной реальности (MagicFolder) для виртуального обучения сварке. Приложение MagicFolder очень простое в использовании. Оно работает в сочетании с новой брошюрой Virtual Welding, на каждой странице которой напечатан графический кодированный символ. Если читатель хочет получить дополнительную информацию, ему нужно просто отсканировать эти кодовые символы при помощи смартфона или планшета, и приложение покажет видео на тему виртуального обучения сварке, трехмерные модели сварочных процессов и предоставит объяснения самых важных преимуществ виртуального обучения сварке. Приложение с викториной помогает ученикам усвоить азы сварки в увлекательной форме. Игра также помогает получить базовые навыки сварки. Система баллов и набор различных уровней повышают мотивацию учеников. Приложение Virtual Welducation Basic доступно бесплатно для устройств под управлением Android и iOS. Еще одним из ноу-хау компании Fronius является приложение для работы со сварочной системой — WeldConnect (рис. 3). Приложение WeldConnect позволяет определить оптимальные параметры для конкретного процесса

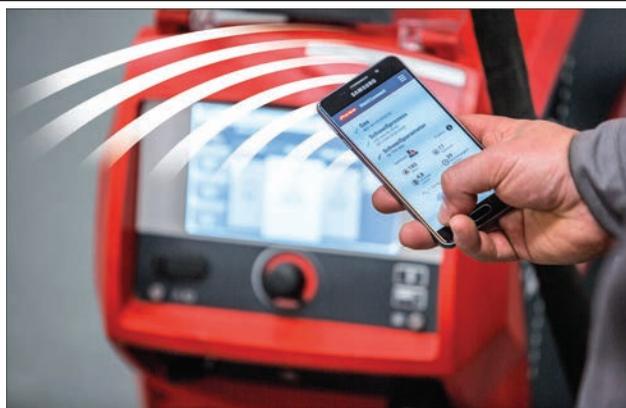


Рис. 3. Приложение WeldConnect быстро и точно рассчитывает производительность наплавки и расход энергии, а также предложит оптимальное сварочное решение для конкретного процесса сварки

сварки. Сварщику нужно только ввести модель используемого источника питания, сварочный процесс, толщину металла, скорость сварки, геометрию сварного шва, а также основной металл, присадочный материал и защитный газ. Данные можно ввести вручную либо путем сканирования QR-кодов материалов при помощи смартфона. На основе этих данных WeldConnect быстро и точно рассчитывает производительность наплавки и расход энергии, а также предложит оптимальное сварочное решение. Больше не нужно настраивать источник питания или подбирать правильные параметры. Результаты можно сохранить, передать по беспроводному интерфейсу в источник питания TPS/i в виде сварочного задания, либо отправить друзьям или коллегам по электронной почте. Приложение очень простое в использовании и предоставляет пошаговые инструкции, давая возможность сварщикам очень быстро настроить необходимые сварочные системы.

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



ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»  
07455, Киевская обл., Броварской р-н,  
с. 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

## Календарь февраля

**1 февраля 1941**

В США началось производство танка «Шерман». По сравнению с клепаным танком М-3 он имел пушку большего калибра (75 мм), литую или сварную башню. В выполнении программы по выпуску цельносварных танков участвовала фирма «Пульман Стандарт», которая разработала технологию сварки корпуса и башни. Была организована конвейерная линия сборки и сварки корпусов. Многослойную ручную дуговую сварку выполняли в нижнем положении, для чего конструкции размещали в позиционерах. Только для изготовления самой массовой детали — танковых колес из низкоуглеродистой стали — применяли автоматическую сварку под флюсом на оборудовании, разработанном еще в 1940 г.

**2 февраля 1952**

Принято постановление Всеукраинской академии наук (ВУАН) по созданию на базе Электросварочного комитета и Электросварочной лаборатории ВУАН научно-исследовательского Института электросварки. Директором Института назначен Евгений Оскарович Патон (1870–1953).

**3 февраля 1938**

Родился Владимир Григорьевич Фартушный — президент Общества сварщиков Украины, специалист в области сварки высоколегированных коррозионноустойчивых сталей, механизации и автоматизации сварочного производства, оборудования для нанесения газотермических покрытий, робототехнических комплексов. Он принимал активное участие в разработке и испытании установки «Вулкан», на которой в 1969 г. осуществлена сварка в космосе. В период 1980–2004 гг. — директор Всесоюзного проектно-конструкторского института сварочного производства. В. Г. Фартушный — автор около 100 научных трудов и изобретений.

**4 февраля 1952**

Б. Е. Патон и Б. И. Медоваром в начале 1952 г. в Институте электросварки впервые разработан процесс электрошлакового переплава (ЭШП) для получения металлов высокого качества. При ЭШП изменением состава шлака и температурного режима процесса осуществляется рафинирование металла.

**5 февраля 2005**

Опробован морской истребитель (FSF-1) — экспериментальное судно морского флота США. Его корпус имеет уменьшенную площадь соприкосновения с водой, что обеспечивает высокую устойчивость даже в неспокойном море. Судно было одним из первых, при производстве которого начали применять сварку трением с перемешиванием при сборке металлических панелей.



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

**6 февраля 1989**

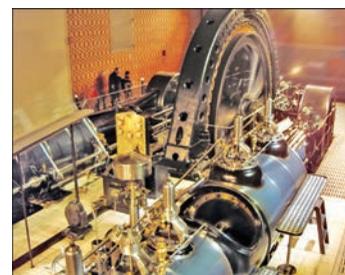
Проведен эксперимент на установке «Янтарь» по нанесению тонкопленочных покрытий методом термического электронно-лучевого испарения и конденсации с целью исследования особенностей и динамики процесса в условиях космоса.

**7 февраля 1950**

Французский изобретатель Р. Саразен предложил способ и машину для непрерывного нанесения покрытия электродов. В соответствии с его изобретением проволока с бухты сматывалась при вращении колеса. Затем она проходила правку в роликах и попадала в экструзионный пресс, после чего ее разрезали на отдельные электроды и транспортером подавали на сушилку.

**8 февраля 1988**

Основан концерн ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) — шведско-швейцарская компания, специализирующаяся в области электротехники, энергетического машиностроения и информационных технологий. Фирма ABB активно занимается производством промышленных роботов, в том числе и для сварочных работ. Офисы концерна представлены в более 100 странах мира. Производственные мощности располагаются на территории Германии, Швейцарии, Швеции, Италии, Франции, Чехии, Индии, Китая, США, Португалии, Бразилии, Финляндии, Эстонии и др. стран.

**9 февраля 1915**

Родился Г. П. Сахацкий (1915–1992) — представитель Патоновской школы, известный ученый и специалист в области холодной сварки цветных металлов и сплавов. В своих работах он отобразил основные принципы контактной стыковой сварки сопротивлением и особенности формирования соединений таких материалов, как высокоуглеродистые и легированные стали, медь, алюминиевые сплавы различных систем легирования.

**10 февраля 1938**

Родился Владимир Петрович Ларионов (1938–2004) — известный российский ученый в области прочности и надежности конструкций, работающих в экстремальных климатических условиях Севера, академик РАН. Им получены фундаментальные результаты в области физического материаловедения, металлургии и кинетики сварочных процессов.

**11 февраля 1965**

Ученые Института электросварки — А. Е. Аснис и И. М. Савич — впервые разработали оборудование, порошковую проволоку и технологию дуговой механизированной сварки мокрым способом под водой. Технология нашла широкое применение при ремонте подводных трубопроводов и конструкций, а также судов на плаву.



**12 февраля 1981**

Президент АН УССР академик Б. Е. Патон награжден Золотой медалью им. М. В. Ломоносова — высшей наградой АН СССР — за выдающиеся работы в области металлургии и технологии металлов.



**13 февраля 1951**

В начале 1951 г. Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с Новокраматорским машиностроительным заводом разработана техника и технология вертикальной электрошлаковой сварки металла толщиной до 2000 мм. Впервые в мире новый способ применен при сварке статора гидротурбины для Мингечаурской ГЭС.



**14 февраля 1917**



Родился С. М. Гуревич — известный ученый в области металлургии и сварки титана и тугоплавких металлов. Впервые в мировой практике С. М. Гуревич разработал технологию сварки титана под флюсом. С его участием разработаны способы электрошлаковой сварки и электрошлакового переплава титана, аргонодуговой сварки по слою флюса с порошковой проволокой. С. М. Гуревич автор почти 600 научных трудов, в том числе более 100 патентов на изобретения.

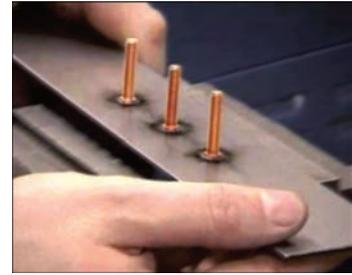
**15 февраля 1938**

Был утилизирован второй трансатлантический лайнер «Левиафан», первоначально построенный как немецкий лайнер «Фатерланд». 6 апреля 1917 г. США вступили в Первую мировую войну и «Фатерланд» был реквизирован американскими властями. Три месяца спустя он был переименован в «Левиафан». После ремонта с использованием сварки был отправлен на ходовые испытания. Они были успешными, судно развило внушительную скорость в 27,48 узлов. «Левиафан» перевозил военные грузы в Северной Атлантике, переправляя войска в Европу. Судно переправило в общей сложности более 100 тыс. солдат за 19 рейсов.



**16 февраля 1912**

Запатентована конденсаторная сварка и устройство для ее реализации. Сотрудник фирмы «Вестингауз Электрик» Л. В. Чабб, экспериментируя с электрическими конденсаторами, обнаружил, что проволока приваривается к алюминиевой пластине при прохождении через них накопленного электрического разряда. Это наблюдение позволило сделать определенные выводы: разряд разрушал прочную оксидную пленку, затрудняющую пайку, и поэтому появилась возможность получать прочное соединение алюминиевых проводов. Конденсаторную сварку сразу же стали применять в электротехнике (приварка серебряных, вольфрамовых и других контактов).



**17 февраля 1982**



Скончался Р. И. Лашкевич (1899–1982) — представитель Патоновской школы, талантливый конструктор, ученый в области создания сварочного оборудования. Им разработан ряд оригинальных сварочных аппаратов, установок, механизмов и устройств, таких как: вальцесварочный станок для шахтных вагонеток, первые образцы аппаратов для электрошлаковой сварки, первый в СССР проходной стан для автоматической сварки труб большого диаметра, головки для электроконтактной сварки магистральных трубопроводов и другое уникальное сварочное оборудование.

**18 февраля 1914**



Родился Владимир Владимирович Подгаецкий (1914–1991) — известный ученый, заслуженный деятель науки и техники Украины. Внес фундаментальный вклад в металлургию сварки, в частности, в изучение взаимодействия металла, шлака и газов, причин образования пор, трещин и других дефектов в металле швов. Опубликовал 215 научных трудов, в том числе 23 монографии.

**19 февраля 1948**



За выдающиеся заслуги в области науки присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РСФСР» Василию Петровичу Никитину — известному ученому в области электротехники, сварки и электромеханики. Основные работы В. П. Никитина посвящены изучению физических процессов в электрической дуге и разработке электромашин и аппаратов для дуговой сварки. Он создал конструкцию однокорпусного трансформатора-регулятора для дуговой сварки, получившего применение в промышленности. В 1926–1929 гг., будучи профессором Екатеринославского горного института, В. П. Никитин одновременно состоял консультантом на многих предприятиях Украины и России.

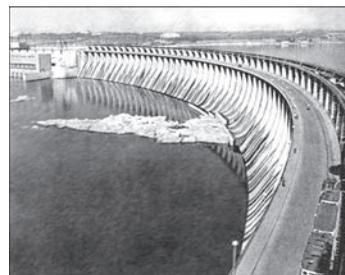
**20 февраля 1986**

20 февраля 1986 года в Советском Союзе был произведен запуск орбитальной научной станции «Мир», пришедшей на смену орбитальным станциям «Салют» и ставшей на полтора десятка лет единственной в мире пилотируемой космической лабораторией для долговременных научно-технических экспериментов и исследования человеческого организма в космосе. В последующем на станции были развернуты солнечные батареи разработки ИЭС им. Е.О.Патона



**21 февраля 1920**

21 февраля 1920 г. была создана Государственная комиссия по электрификации России (план ГОЭРЛО). Позже в плане ГОЭЛРО появилось название будущего сооружения — Днепровская гидроэлектрическая станция. 15 марта 1927 г. на скале «Любовь» был установлен красный флаг с надписью «Днепрострой начат». Широкое распространение при строительстве получили автогенная резка и сварка, электросварка, аппараты для стыковки арматуры и другие механизмы.



**22 февраля 1937**



Родился Валерий Михайлович Сагалевич (1937–1995) — профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученый в области сварки, сварочных деформаций и напряжений. Труды профессора В. М. Сагалевича посвящены проблемам прочности, теории сварочных деформаций и напряжений, в том числе деформациям тонколистовых и тонкостенных конструкций при сварке.

**23 февраля 1934**

Французские изобретатели Р. Саразен и О. Монеyron получили патент на разработанное ими электродное покрытие, в состав которого входили соединения щелочных и щелочноземельных металлов (полевой шпат, мрамор, мел и сода). Благодаря низкому потенциалу ионизации таких элементов, как натрий, калий, кальций, обеспечивалось легкое возбуждение дуги и поддержание ее горения.



**24 февраля 1988**

Скончался Джеймс Розатти (1911–1988) — американский скульптор, создававший свои скульптуры путем сварки нержавеющей стали. Самые известные его произведения созданы, начиная с 1960-х годов, где особую роль занимает скульптура из нержавеющей стали «Идеограмма», высотой 23 фута. Около сорока монументальных скульптур Джеймса Розатти расположены в Соединенных Штатах Америки и в других странах.



**25 февраля 1936**



Родился Олег Кузьмич Назаренко (1936–2014) — представитель Патоновской школы, известный ученый в области электронно-лучевой сварки, член-корреспондент НАН Украины. Им дано физико-техническое обоснование возможности избежания дефектов в сварных соединениях при пробоях в электронной пушке путем кратковременного снятия ускоряющего напряжения. На этой основе он создал совершенные источники питания, разработал принципы автоматического направления электронного луча вдоль сварного стыка и создал соответствующие системы, использующие вторично-электронную эмиссию из зоны сварки в качестве источника информации. При его участии в промышленность Украины внедрена технология и оборудование для электронно-лучевой сварки ракетных и газотурбинных двигателей.

**26 февраля 1934**

Открыт первый завод по выпуску «народного» автомобиля «Фольксваген». Первым выпускаемым авто стал известный автомобиль VW «Жук». Это самый массовый автомобиль в истории, производившийся без пересмотра базовой конструкции. Всего было изготовлено 21529464 автомобилей. Разработкой занимался Фердинанд Порше (в последующем создатель второго варианта танка «Тигр»), который поддерживал связь с Фордом и другими новаторами и активно внедрявший новые технологии на заводе. Сварка обеспечивала надежность и быструю сборку автомобиля на конвейере.

**27 февраля 1917**

Джон Генри Линкольн публикует один из своих патентов в области сварки. Он является основателем компании «Lincoln Electric», которая превратилась в американскую транснациональную компанию, выпускающую оборудование для дуговой сварки, роботизированной сварки, плазменной и газовой резки. В 1909 г. впервые в истории компания изготавливает сварочный аппарат. В 1911 г. «Lincoln Electric» выпускает первый в мире портативный сварочный аппарат с регулируемым напряжением.

**28 февраля 1962**

В конце февраля на общем собрании АН УССР выбран новый состав Президиума. Президентом стал академик АН УССР Борис Евгеньевич Патон. Сегодня НАН Украины включает 174 института. Численность сотрудников составляет свыше 30 тыс.



## X Международная специализированная выставка КИЕВСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА

**IEC** МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР

Украина, г. Киев, Броварской пр-т, 15  
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56  
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**3-5 апреля  
2018**

Генеральный  
информационный партнер:

**Инструмент**

Эксклюзивный  
медиа партнер:

**ГОЛОВНОГО  
ИНЖЕНЕРА**

Технический  
партнер:

**RealMedia**

**Подписка на журнал «Автоматическая сварка»**  
[www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as)  
 Подписной индекс 70031

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
900 грн.	1800 грн.	5400 руб.	10800 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: Каталог видань України, «Прессцентр», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



**Подписка на журнал «The Paton Welding Journal»**  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj)  
 Подписной индекс 21971

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	5400 руб.	10800 руб.	174 дол. США	348 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Журнал «Автоматическая сварка» в полном объеме переиздается на английском языке под названием «The Paton Welding Journal» и распространяется по редакционной подписке (тел./факс: 38044 200-82-77, 200-54-84, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)).



**Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com).  
 В 2018 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2016 гг. в формате \*.pdf.**

**Реклама в журналах «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»**

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

- ◆ Первая страница обложки, 190×190 мм
- ◆ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
- ◆ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
- ◆ Вклейка А4, 200×290 мм
- ◆ Разворот А3, 400×290 мм
- ◆ А5, 165×130 мм

**Стоимость рекламы**

- ◆ Цена договорная
- ◆ Предусмотрена система скидок
- ◆ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- ◆ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- ◆ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 30.01.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24.  
 Печать ООО «ДИА».  
 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.