

**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,  
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. Гуань Цяо  
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай  
д.х.н. М. Зиниград  
Ун-т Ариэля, Израиль  
д-р инж. У. Райсген  
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия  
д.т.н. Я. Пилярчик  
Ин-т сварки, Гливице, Польша

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 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

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

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

Рекомендовано к печати  
редакционной коллегией журнала

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

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная  
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

**СОДЕРЖАНИЕ**

Патон Б.Е. Начало эры космических технологий ..... 9

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

Кривцун І.В., Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Клочков І.М.,  
Квасницький В.В., Бабич О.А., Cai Detao, Luo Ziyi,  
Han Shanguo. Гібридне лазерно-мікроплазмове зварюван-  
ня тонколистового титанового сплаву Ti–Al–V ..... 13  
Haiyan Wanga, Ma Yanyib, Zhang Yupenga, Dong Chunlina,  
Yi Yaoyonga, Xi Huaia. Influence of laser power and welding  
velocity on the microstructure of Zr-based bulk metallic  
glass welded joints ..... 18  
Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Сенчишин В.С., Шарик М.В.,  
Гаврилюк В.Я. Вплив горизонтальної механічної вібрації  
на експлуатаційні властивості наплавленого металу ..... 22  
Борисова А.Л., Капорик Н.И., Цымбалистая Т.В., Василь-  
ковская М.А. Диффузионные жаростойкие покрытия  
для нержавеющей и углеродистой сталей ..... 28

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

Патон Б.Е., Ющенко К.А., Козулин С.М., Лычко И.И.  
Электрошлаковый сварочный процесс. Анализ состоя-  
ния и тенденции развития (Обзор) ..... 36  
Турык Э., Банасик М., Стано С., Урбаньчык М. Особен-  
ности гибридной лазерно-дуговой сварки нержавеющей  
стали ..... 47  
Фальченко Ю.В., Петрушинец Л.В., Мельниченко Т.В.,  
Устинов А.И., Федорчук В.Е. Диффузионная сварка в  
вакууме интерметаллида  $\gamma$ -TiAl с жаропрочным нике-  
левым сплавом с применением нанопрослоек Al/Ni ..... 54

**ХРОНИКА**

72-а щорічна асамблея Міжнародного інституту зва-  
рювання ..... 62  
Международная конференция «Ti-2019» ..... 64  
Пам'яті Г.М. Григоренка ..... 66

**Информация**

Инжиниринг, роботы, аддитивные технологии компа-  
нии Triada Welding ..... 3  
ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона расширяет номенклатуру  
своей продукции ..... 5  
Линейка новых установок для наплавки прокатных валков .... 7  
Американскому сварочному обществу — 100 ..... 67  
Стратегия ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» на современном этапе ..... 69  
Рождение и становление электрошлаковой сварки ..... 70

# 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

*Патон Б.Є.* Початок ери космічних технологій ..... 9

*Paton B.E.* Start of the space technology era ..... 9

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Кривцун І.В., Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Клочков І.М., Квасницький В.В., Бабич О.А., Cai Detao, Luo Ziyi, Han Shanguo.* Гібридне лазерно-мікроплазмове зварювання тонколистового титанового сплаву Ti-Al-V ..... 13

*Krivtsun I.V., Haskin V.Yu., Korzhik V.M., Klochkov I.M., Kvasnytskyi V.V., Babich O.A., Cai Detao, Luo Ziyi, Han Shanguo.* Hybrid laser-microplasma welding of Ti-Al-V titanium alloy ..... 13

*Haiyan Wang, Ma Yanyib, Zhang Yupenga, Dong Chunlina, Yi Yaoyonga, Xi Huaia.* Вплив потужності лазера та швидкості зварювання на мікроструктуру насипної маси на основі цирконію зварних з'єднань з металевого скла ..... 18

*Haiyan Wang, Ma Yanyib, Zhang Yupenga, Dong Chunlina, Yi Yaoyonga, Xi Huaia.* Influence of laser power and welding velocity on the microstructure of Zr-based bulk metallic glass welded joints ..... 18

*Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Сенчишин В.С., Шарик М.В., Гаєрилюк В.Я.* Вплив горизонтальної механічної вібрації на експлуатаційні властивості наплавленого металу ..... 22

*Pulka Ch.V., Pidgurskiy M.I., Senchishin V.S., Sharik M.V., Gavrilyuk V.Ya.* Effect of horizontal mechanical vibration on deposited metal service properties ..... 22

*Борисова А.Л., Капорік Н.І., Цимбаліста Т.В., Васильківська М.А.* Дифузійні жаростійкі покриття для нержавіючої та вуглецевої сталей ..... 28

*Borisova A.L., Kaporik N.I., Tsymbalista T.V., Vasilkovskaya M.A.* Diffusion heat-resistant coatings for stainless and carbon steels ..... 28

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

### INDUSTRIAL

*Патон Б.Є., Ющенко К.А., Козулін С.М., Личко І.І.* Електрошлаковий зварювальний процес. Аналіз стану та тенденції розвитку (Огляд) ..... 36

*Paton B.E., Yushchenko K.A., Kozulin S.M., Lychko I.I.* Electroslag welding process. Analysis of state and tendencies of development (Review) ..... 36

*Турик Е., Банасік М., Стано С., Урбанчик М.* Особливості гібридного лазерно-дугового зварювання нержавіючої сталі ..... 47

*Turyk E., Banasik M., Stano S., Urbanchik M.* Peculiarities of hybrid laser-arc welding of stainless steel ..... 47

*Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Мельниченко Т.В., Устинов А.І., Федорчук В.Є.* Дифузійне зварювання у вакуумі інтерметаліда  $\gamma$ -TiAl з жароміцним нікелевим сплавом з використанням нанопрошарків Al/Ni ..... 54

*Falchenko Yu.V., Petrushynets L.V., Melnichenko T.V., Ustinov A.I., Fedorchuk V.E.* Vacuum diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl intermetallic with high-temperature nickel alloy with application of intermediate Al/Ni nanolayers ..... 54

### ХРОНІКА

### NEWS

72-а щорічна асамблея Міжнародного інституту зварювання ..... 62

72 Annual Assembly of IIW ..... 62

Міжнародна конференція «Ti-2019» ..... 64

International Conference «Ti-2019» ..... 64

Пам'яті Г.М. Григоренка ..... 66

In memory of G.M.Grigorenko ..... 66

### Інформація

### Information

Інжиніринг, роботи, адитивні технології компанії Triada Welding ..... 3

Engineering, robots, additive technologies of Triada Welding Company ..... 3

ДЗЗУ ІЕЗ ім. Є.О. Патона розширює номенклатуру своєї продукції ..... 5

PWI OZSO expands nomenclature its products ..... 5

Лінійка нових установок для наплавлення прокатних валків ..... 7

A range of new roll surfacing systems ..... 7

Американському зварювальному товариству — 100 67

American Welding Society is 100 ..... 67

Стратегія ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК» на сучасному етапі ... 69

The strategy of LLC «TM.VELTEK» at the present stage ..... 69

Народження і становлення електрошлакового зварювання..... 70

The birth and formation of electroslag welding ..... 70

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: (38044) 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

## Инжиниринг, роботы, аддитивные технологии компании Triada Welding

**Миссия компании: «Мы делаем мир технологичней,  
создавая умные производства»**

Triada Welding — инжиниринговая компания, специализирующаяся в области сварки с 1992 г. Технологичная и современная компания активно развивается, внедряя новации 4.0 у себя на производстве. Создавая высокотехнологичную продукцию для украинской промышленности, она, одна из немногих, предлагает экспорт высоких технологий.

Профессиональный инженерный подход и серьезный производственный опыт позволяют компании Triada Welding быть в центре развития индустриального комплекса Украины, предлагать и внедрять успешные решения перехода к Индустрии 4.0.

Компания Triada Welding — интегратор промышленных роботизированных сварочных комплексов, официальный представитель в Украине Yaskawa Motoman (Япония), одного из ведущих в мире производителей роботов. Специализируется в проектировании и разработке технологий с применением промышленных роботов для автоматизации сварочных процессов, в том числе контактной сварки, наплавки, перемещения изделий. При производстве роботизированных сварочных комплексов (РТК) используется оборудование передовых мировых производителей: Fronius (Австрия), Abicor Binzel (Германия), Askaunak (Турция), Fidat (Италия). Triada Welding — их официальный сертифицированный представитель в Украине.



На базе собственного технического центра отрабатываются все процессы. После установки РТК предоставляется весь спектр гарантийных сервисных услуг по обслуживанию и технической поддержке, проводится обучение персонала предприятия-заказчика программированию робота, работе на РТК. Производственно-технический центр имеет полную диагностическую базу по ремонту, восстановлению, технической поддержке как самых простых сварочных аппаратов, так и сложных программируемых установок.

Triada Welding проводит инженерно-консультационные услуги, включающие совместную разработку технических заданий, подбор оборудования, доведение конструкторских разработок до стадии производства. 27-летний опыт работы на рынке сварочного оборудования позволяет легко и эффективно решать любые задачи, связанные с роботизацией сварочных процессов.

### Основные направления деятельности компании:

- инжиниринг;
- аутсорсинг;
- роботизация сварочных процессов;
- поставка сварочного оборудования и материалов;
- производство систем защиты при сварке;
- проектирование и производство сварочной оснастки и кондукторов;
- обучение;
- R&D.

Triada Welding первая в мире и единственная компания в Украине, получившая сертификат соответствия CFD. Каждые три года компания проходит европейский аудит — полную проверку профессиональных качеств и квалификации сотрудников, соответствие всем международным стандартам техцентра. Все это необходимо для представления в Украине современного высококлассного сварочного оборудования, интеллектуальных сварочных систем Fronius (Австрия).



Компания имеет уникальный опыт разработки и производства оборудования РТК, нестандартного оборудования, в том числе самостоятельно проектирует и изготавливает:

- инструментальную оснастку и кондуктора;
- уникальные вспомогательные элементы, зажимные устройства;
- защитные сварочные системы.

Компания предоставляет свои промышленные мощности для аутсорсинга. Роботизированный сварочный комплекс Yaskawa выполняет частично или целиком сварку различных деталей от предприятий-заказчиков. Работа в партнерстве — реальная возможность подключать высокопрофессиональных специалистов для решения локальных, внутренних, задач. Это возможность доступа к передовому оборудованию РТК с минимальными расходами — заказчик платит только за сварочный шов, получая при этом 100%-ое качество и полное отсутствие брака.

Производство современных мобильных конструкций, предназначенных для защиты людей и окружающего пространства при сварке, включает: проектирование, разработку, изготовление и монтаж с дальнейшим обслуживанием. Вся техническая документация разрабатывается конструкторским отделом компании на базе многолетнего опыта

изучения подобных систем. Защитные ПВХ материалы, используемые для изготовления защитного полотна, отвечают европейским стандартам и требованиям EN-1598.

На основе техцентра создан и успешно работает подразделение R&D — исследование и развитие новых технологий. В этом году компания Triada Welding получила гранд Программы USAID «Конкурентоспособна економіка України» и успешно ведет работы по исследованию и развитию аддитивных технологий. На базе центра действует общая программа обучения и взаимодействия Triada Welding и НУ Запорожская Политехника. Созданы обучающие программы для студентов технических вузов, колледжей, ВПУ, проводятся семинары и лабораторные работы, научно-технические конференции студентов. Появился совместный проект Triada Welding с НУ «Запорожская Политехника» по созданию и внедрению обучающей технологии VR/AR.

Компания Triada Welding является членом ТПП Украины, регулярно принимает участие в различных технических выставках и семинарах как в Украине, так и за рубежом. Предприятие имеет множество наград и знаков отличия в промышленной отрасли. За высокий профессионализм и серьезный подход к решению производственных задач награждено почетными знаками «Могутність краю» и за «Значительный вклад в развитие промышленности Украины».

В этом году компания успешно реализовала несколько проектов по роботизации, до конца года в планах завершить еще четыре сложных проекта по интеграции РТК в производство, в том числе и за рубежом.

Красносельская Е.Г.



Украина, г. Запорожье  
 +38(067) 333-10-58,  
 +38(050) 322-95-53  
 www: triada-welding.com

## ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона расширяет номенклатуру своей продукции

Опытный завод сварочного оборудования — ведущий производитель сварочного оборудования в Украине и один из крупнейших производителей сварочного оборудования и материалов в Восточной Европе. Одним из важных направлений развития Завода является расширение географии экспорта продукции ПАТОН™. В 2019 г. Завод активно наращивает объемы поставок на рынки стран, где продукция ПАТОН™ уже хорошо зарекомендовала себя и пользуется спросом у местных профессионалов сварочного дела: Польша, Румыния, Молдова, Беларусь, Грузия, Узбекистан и др.

В 2019 г. добавился еще целый ряд стран, куда экспортируется продукция ОЗСО, доводя таким образом общее количество таких стран до 30. В частности, в этом году были организованы поставки сварочных аппаратов и электродов в Индию, Шри-Ланку, Египет, Турцию и Буркина-Фасо. Высокая надежность, широкая функциональность, а также во многом уникальные технические характеристики дают возможность сварочному оборудованию ПАТОН™ успешно конкурировать с продукцией ведущих мировых производителей на рынках самых разных стран по всему миру.

Также не стоят на месте и конструкторские отделы Опытного завода — сейчас активно ведется работа над мощными инверторными источниками сварочного тока, расширением ассортимента продукции ПАТОН™ за счет мощных промышленных аппаратов для аргодуговой сварки и плазменной резки.

Совсем недавно Заводом уже были представлены новые мощные инверторные аппараты с номинальным сварочным током до 500 А: ВДИ-500 PRO и ПСИ-500-1 PRO. Данные аппараты предназначены для промышленного использования в нескольких режимах сварки: полуавтоматическая и аргодуговая сварка в среде защитных газов и смесей, а также ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Аппараты отличаются высоким показателем продолжительности нагрузки (ПН) — до 70 % на максимальном токе в 500 А, чего хватает для проведения сварочных работ покрытым электродом диаметром 6 мм и более, а также сварочной проволокой диаметром до 1,6 мм.

ВДИ-500 PRO и ПСИ-500-1 PRO относятся к профессиональной серии аппаратов с полностью цифровым управлением, за счет чего они имеют более 20 настраиваемых па-



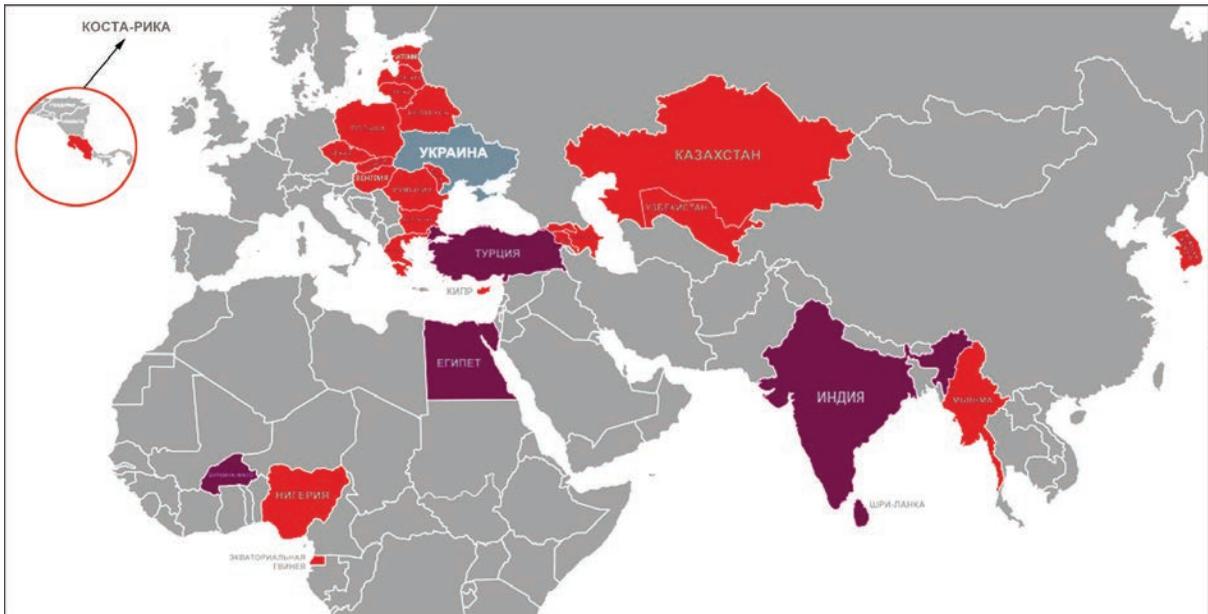
## ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

- ✦ Плазменно-Порошковая Наплавка (ППН) и Микро-ППН.
- ✦ Решения под ключ от ручной до многоосных автоматических ППН систем.
- ✦ Плазмотроны и Порошковые Питатели.
- ✦ Запчасти и Обслуживание.
- ✦ Разработка инновационных решений наплавки.



Больше информации смотрите здесь





раметров и информативный ЖК-дисплей, которые позволяют настроить работу аппарата под индивидуальные потребности даже самого требовательного сварщика. Помимо этого, регулируемые функции «Антизалипание», «Горячий старт» и «Форсаж дуги» делают сварочный процесс еще более комфортным, а встроенный блок снижения напряжения холостого хода обеспечивает безопасность при работе сварщика в условиях повышенной влажности. Для обеспечения более тщательного переноса металла в сварочную ванну и его перемешивания данные аппараты оснащены импульсным режимом с регулированием частоты импульса от 0,2 до 500 Гц.

Оба аппарата комплектуются длинными медными сварочными кабелями украинского производства, а также высококачественными сварочными аксессуарами от немецкого производителя — компании Abicor Binzel.

Аппараты ВДИ-500 PRO и ПСИ-500-1 PRO сочетают высокую мощность с малыми массогабаритными характеристиками. Полуавтомат ПАТОН™ ПСИ-500-1 PRO выполнен в двухкорпусном исполнении, что в случае транспортировки дает возможность значительно уменьшить его общие габариты, отделив блок подачи проволоки от источника сварочного тока. Также блок подачи проволоки оборудован специальным кронштейном, который надежно фиксирует его на источнике тока, но в то же время дает возможность блоку подачи поворачиваться на 360° для повышения мобильности и удобства для сварщика.

На финальной стадии разработки находятся мощные промышленные аппараты для аргонодуговой сварки — АДИ-315 PRO AC/DC, а также плазменной резки — ПРИ-100 PRO, опытные образцы которых будут представлены Опытным заводом сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона на выставке Международный промышленный форум 2019.

Таким образом, ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона проводит активную работу, неуклонно расширяя географию экспорта своей продукции и постоянно расширяя ассортимент инверторного сварочного оборудования ПАТОН™, поддерживая, тем самым, статус ведущего производителя сварочного оборудования и материалов в Украине и продвигая бренд «Сделано в Украине» далеко за ее пределами.

Антон Степахно

## ЛИНЕЙКА НОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАПЛАВКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Прокатные валки являются важнейшими элементами прокатного оборудования. В процессе эксплуатации валки горячей прокатки подвержены окислительному и абразивному изнашиванию, а также термической усталости. Для восстановления изношенных валков листопрокатных станов широко применяют наплавку сплошными электродными проволоками или лентами, порошковыми проволоками или спеченными лентами.

Кроме рабочих, наплавке подвергают и опорные валки листопрокатных станов, которые, как правило, изготавливают из заэвтектоидной стали 9ХФ. Эти валки в процессе работы испытывают большие статические, динамические и контактные нагрузки. Основными причинами выхода опорных валков из строя являются усталостные разрушения поверхностных слоев бочки валка (отслоение, выкрашивание), а также изнашивание при трении металла по металлу.

Среди трудностей, возникающих при наплавке валков из заэвтектоидных трудносвариваемых сталей, следует выделить опасность образования кристаллизационных трещин. Для их предупреждения необходим предварительный подогрев валка до температуры не ниже 400 °С. Нагрев проводят инъекционными беспламенными газовыми горелками или индукторами, при этом скорость нагрева не должна превышать 20 °С/ч.

Вопросы технологической наплавки прокатных валков подробно освещены в литературе.

В качестве оборудования для наплавки листопрокатных валков используют вальценаплавочные станки типа КЖ и другие специализированные установки.

В НПФ ВИСП разработано новое поколение установок для электродуговой наплавки валков листопрокатных станов. Линейка нового оборудования включает три установки, технические характеристики которых приведены в таблице.

Все установки выполнены по единой конструктивной схеме. Отличительной особенностью нового поколения оборудования является более высокий уровень механизации подготовительно-заключительных и автоматизации сварочных операций.

Для более детальной характеристики нового оборудования рассмотрим конструктивные особенности наиболее крупной установки УН-7000-2, приведенной на схеме.

Основой разработанного оборудования является каркас, на котором установлено техно-

**Технические характеристики установок для наплавки валков прокатных станов**

Наименование показателей	Модель установки		
	УН-7000-2	УН-3000-2	УН-1500
Размеры наплавляемых деталей, мм			
длина	500...6000	500...3500	50...1500
диаметр	100...660	80...390	60...200
Частота вращения патрона, об./мин	0,1...4,0	0,2...1,5	0,1...5,0
Мощность привода вращения, кВт	2,2	1,0	1,0
Мощность гидравлической станции, кВт	1,5	1,5	0,55
Способ наплавки	MIG/MAG, FCAW-G	MIG/MAG, FCAW-G, CAW	MIG/MAG
Длина горизонтального перемещения каретки 1, мм	6810	3400	2100
Длина горизонтального перемещения каретки 2, мм	6810	3400	-
Скорость горизонтального перемещения каретки, мм/мин	3...6000	3...6000	7...1500
Вертикальный ход горелки (мундштука), мм	450	430	550
Давление в гидросистеме, бар (мах)	210	210	210
Максимально потребляемая мощность, кВт	124	124	34
Параметры сети питания	3Ф/50 Гц×380 В	3Ф/50 Гц×380 В	3Ф/50 Гц×380 В
Габаритные размеры, мм			
длина	8600	5800	3300
ширина	2000	2000	1930
высота	2530	2530	1250
Масса (без сварочного оборудования), кг	4800	3400	1300



Внешний вид установки УН-3000-2

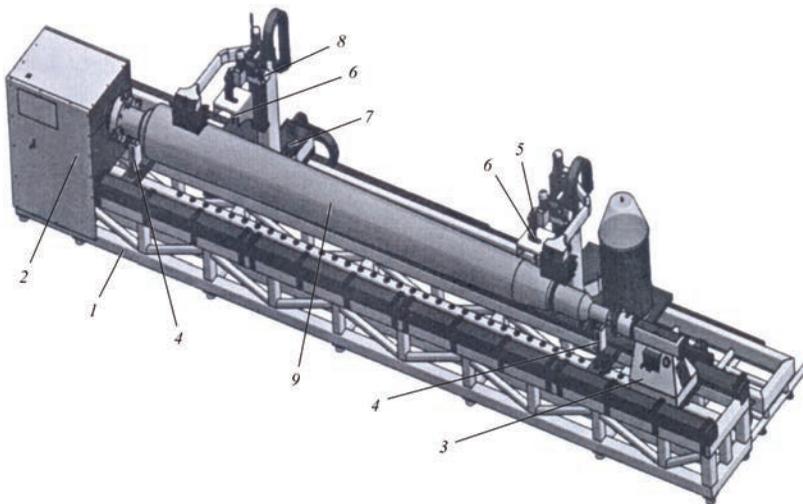


Схема установки УН-7000-2: 1 — каркас; 2 — передняя бабка; 3 — задняя бабка; 4 — ловители; 5 — механизм подачи проволоки; 6 — горелка; 7 — привод горизонтального перемещения; 8 — привод вертикального перемещения; 9 — наплавляемая деталь

Процесс наплавки осуществляется одновременно двумя головками с автономным охлаждением горелок в автоматическом режиме посредством использования программируемого контроллера (ПК). Управление работой установки осуществляется с выносных пультов, основного дисплея и органов гидравлики, расположенных на задней бочке.

Для облегчения установки наплавляемых валков и обеспечения их точного позиционирования относительно центров предусмотрены два ловителя с гидравлическими цилиндрами подъемной силой 75 кН каждый.

Установка УН-7000-2 уже второй год эксплуатируется на одном из предприятий компании «Метинвест» (г. Мариуполь). В настоящее время заканчивается изготовление еще двух установок другой модели УН-3000-2 для упомянутого выше заказчика.

логическое оборудование. На левой стороне расположена передняя балка с вращателем. На верхней части каркаса расположены рельсовые направляющие, по которым движется задняя бабка и ловители. К задней части каркаса прикреплена дополнительная рама, на которой установлены горизонтальные валы на опорах, по которым движутся две независимые друг от друга каретки. На платформах кареток предусмотрено место для установки бочек с порошковой проволокой, а также размещены колонны, по которым осуществляется вертикальное перемещение горелок и колебательного механизма.

Ю.А. Никитюк, Е.В. Гримальский, Г.И. Лашенко

## НАЧАЛО ЭРЫ КОСМИЧЕСКИХ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Академик Б.Е. Патон

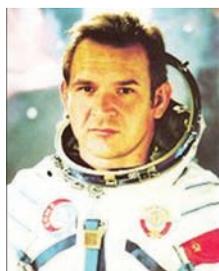
16 октября 1969 г. летчиками-космонавтами СССР Георгием Шониным и Валерием Кубасовым впервые в мире на космическом корабле «Союз-6» с помощью универсальной автоматизированной установки «Вулкан» были проведены эксперименты по сварке и резке в открытом космосе.

Создатель практической космонавтики Сергей Павлович Королев еще в начале 1960-х гг. поставил перед Институтом электросварки им. Е.О. Патона задачу — разработать программу экспериментов для осуществления сварки и резки в космосе. Эта программа научных исследований, конечной целью которой было создание сварочной аппаратуры и технологий для соединения материалов в космосе с помощью сварки, начала осуществляться в 1964 г., а в октябре 1969 г. были проведены эксперименты.



Георгий Степанович Шонин (1935–1997 гг.) — летчик-космонавт СССР, Герой Советского Союза

В 1957 г. окончил Ейское военно-морское авиационное училище летчиков. Служил в ВВС Военно-Морского Флота СССР. В 1960 г. он отобран в отряд космонавтов. В 1968 г. окончил Военно-воздушную инженерную академию имени Н.Е. Жуковского. Кандидат технических наук. Совершил космический полет 11–16 октября 1969 г. в качестве командира космического корабля «Союз-6». С ноября 1990 г. Г.С. Шонин находился в запасе.



Валерий Николаевич Кубасов (1935–2014 гг.) — летчик-космонавт СССР, дважды Герой Советского Союза

В 1958 г. окончил Московский авиационный институт. В 1958–1966 гг. работал в РКК «Энергия». Занимался проектированием пилотируемых космических кораблей. В 1966–1993 гг. состоял в отряде космонавтов. Совершил три полета в космос (1969, 1975, 1980 гг.). 11–16 октября 1969 г. совершил первый космический полет в качестве бортинженера космического корабля «Союз-6» (в экипаже с Георгием Шониным). Во время полета впервые в мире был проведен эксперимент по сварке в условиях космоса. После ухода из отряда космонавтов продолжил работать в РКК «Энергия», а с 1997 г. был научным консультантом.

Автоматизированная сварочная установка «Вулкан», на которой были проведены эксперименты по сварке и резке в открытом космосе, была разработана и изготовлена в Институте электросварки им. Е.О. Патона.

В создании установки принимали участие ведущие ученые института, конструкторы, технологи, рабочие-сборщики аппаратуры, испытатели. Большую помощь в создании установки оказали специалисты РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Она позволила выполнять сварку плавлением тремя различными способами: дугой низкого давления с плавящимся электродом, сжатой дугой низкого давления с полым катодом и электронным лучом. Установка «Вулкан» состояла из двух отсеков. В одном (не герметичном) располагались устройства для выполнения каждого из перечисленных способов сварки и вращающийся стол со свариваемыми образцами. Во время работы в этом отсеке поддерживалось низкое давление — космический вакуум. В другом отсеке (герметичном) были установлены автономный аккумуляторный источник электропитания, вторичный источник питания (ВИП — разработка Института электродинамики НАН Украины), блоки управления, средства измерения. Установка была оснащена дистанционным пультом управления. Масса аппаратуры около 50 кг.



Автоматизированная сварочная установка «Вулкан»



Кубасов В.Н. и Шонин Г.С. с установкой «Вулкан» перед полетом на корабле «Союз-6» (1969 г.)

Мощность сварочных устройств для различных способов составляла от 0,6 до 1,0 кВт.

Установка «Вулкан» была размещена в шлюзовом отсеке космического корабля «Союз-6». На период проведения экспериментов этот отсек был разгерметизирован. В нем поддерживалось давление, близкое к забортному  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Экипаж во время эксперимента находился в герметичном, возвращаемом на Землю, отсеке, отделенном от шлюзового отсека закрытым люком.

Космическое пространство, в котором летают пилотируемые космические корабли и станции, отличается от условий на Земле рядом так называемых факторов космического пространства и, в первую очередь, микрогравитацией и космическим вакуумом. Эксперименты по сварке в космосе были совершенно новым направлением среди тех работ, которые выполнял наш Институт. Поэтому, когда определялись направления работ по сварке в космосе, рассматривались разные виды сварки как в твердой фазе, так и плавлением. Но наиболее гибким и широким видом сварочных работ в космосе для выполнения возможных монтажных и ремонтно-восстановительных операций являются способы сварки плавлением.

Использовать способы сварки, требующие приме-

нения газов, в открытом космосе весьма затруднительно. Космическое пространство — это полностью открытый бесконечный объем. Поэтому молекулы газа быстро удаляются в открытый космос. Большие трудности возникают также при применении в космосе метода дуговой сварки плавящимся электродом. При снижении давления окружающей атмосферы характер дугового разряда меняется. При низком давлении плазмообразующим веществом является уже не газ, а пары присадочного и свариваемого материалов. Давление паров в районе столба дуги хотя и выше окружающего, но недостаточно для получения локализованного дугового разряда. Большое влияние на процесс дуговой сварки плавящимся электродом оказывает микрогравитация. Она затрудняет переход в шов расплавляемого электродного металла, а находящиеся на электроде капли металла могут достигать очень больших размеров. Рассмотренные выше проблемы практически отсутствуют при электронно-лучевой сварке. Космический вакуум лишь способствует качественному выполнению электронно-лучевой сварки, а микрогравитация не оказывает на этот процесс существенного влияния.

Проведенные эксперименты позволили установить, что наиболее приемлемым видом сварки в открытом космосе является электронно-лучевая сварка. Было установлено, что при длительной невесомости и космическом вакууме процессы сварки и резки электронным лучом протекают стабильно и обеспечиваются необходимые условия для нормального формирования сварных соединений и резов. Таким образом, эксперименты, проведенные на установке «Вулкан», дали богатейшую информацию, которая позволила в дальнейшем создать новые образцы космической сварочной аппаратуры и разработать технологии сварочных процессов в космосе.

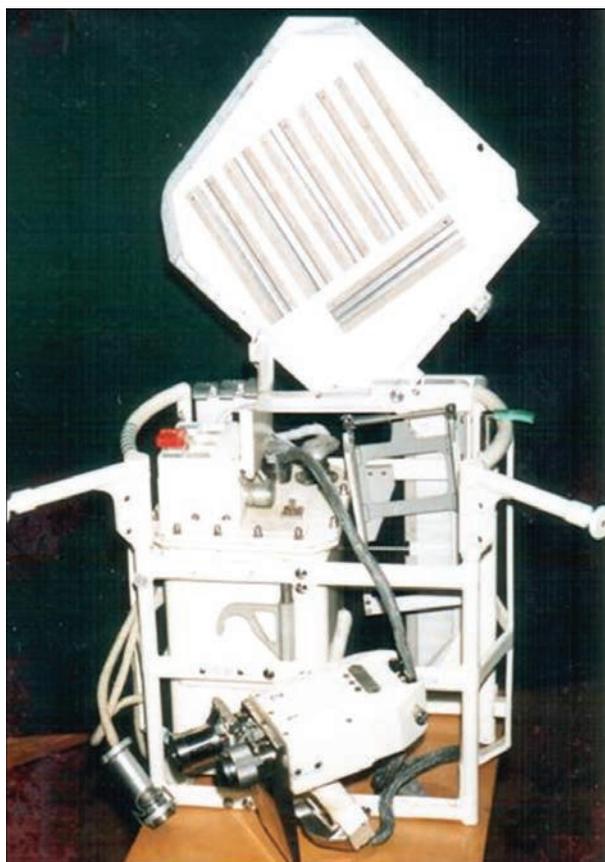
Проведенный эксперимент положил начало эры космических сварочных технологий.

Работы по созданию оборудования и технологий сварки в открытом космосе были продолжены.

При работе в открытом космосе на борту космического аппарата могут возникнуть самые неожиданные ситуации, требующие применения сварки и родственных технологий, причем зачастую вид и объем операций должен будет определяться космонавтами непосредственно на месте. Им придется работать на разных участках космического аппарата и иметь дело с различными конструкционными материалами. Для этих целей в Институте электросварки им.



Патон Б.Е. и Кубасов В.Н. возле установки «Вулкан»



Универсальный ручной инструмент (УРИ)

Е.О. Патона был создан универсальный рабочий инструмент (УРИ). Испытания УРИ в условиях открытого космоса было проведено на борту станции «Салют-7» летчиками-космонавтами С.Е. Савицкой и В.А. Джанибековым. Проведенные эксперименты по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий показали хорошие результаты и подтвердили высокую работоспособность аппаратуры УРИ в открытом космосе.

Следующим поколением оборудования для сварки в открытом космосе было создание аппаратуры «Универсал». Основным его отличием от УРИ было увеличение более чем в два раза выходной мощности. Кроме того, был модифицирован ряд основных узлов, которые обеспечили увеличение надежности инструмента. Комплекс «Универсал» прошел всесторонние наземные испытания и был рекомендован для использования в качестве штатного инструмента на орбитальных пилотируемых станциях. К сожалению, в силу ряда объективных причин, комплекс «Универсал» не был испытан в открытом космосе, хотя его испытание предполагалось как на борту космического челнока «Коламбия», так и на станции «Мир».

Анализ результатов наземных технологических экспериментов, проведенных с помощью аппаратуры «Универсал», показал, что с его помощью можно сваривать алюминиевые и титановые сплавы, а также нержавеющую сталь толщиной до 1,5 мм.

В настоящее время в ИЭС им. Е.О. Патона проводятся работы по созданию следующего поколения электронно-лучевого инструмента для сварки в открытом космосе, который включает триодную электронно-лучевую пушку, отделенную от высоковольтного источника питания. Отделение электронно-лучевой пушки от источника питания и использование для этой цели гибкого высоковольтного кабеля с малогабаритным высоковольтным разъемом дает



Комплект оборудования для ручной электронно-лучевой сварки «Универсал»



Ручной электронно-лучевой инструмент нового поколения

возможность существенно уменьшить габариты и массу инструмента, повысить его маневренность при осуществлении технологических процессов в открытом космосе, увеличить срок непрерывной работы и эксплуатационную надежность, а также облегчить операции замены инструментов разного технологического назначения непосредственно за бортом космического аппарата.

В электронно-лучевом инструменте нового поколения значительно увеличена мощность — до 2,5 кВт, что позволяет сваривать алюминиевые и титановые сплавы, а также нержавеющую сталь толщиной 6 мм. Электронно-оптическая система пушки позволяет получать остросфокусированный луч диаметром не больше 0,6 мм. Масса пушки равна 2,5 кг (вдвое меньше, чем в «Универсале»). Ресурс работы катода значительно увеличен и равен 30...40 ч. Смену отработанного катодного узла можно будет провести на орбите в течение 5...10 мин. Предусмотрена возможность работы инструмента не только в ручном, но и автоматическом режиме с использованием робототехнических устройств или манипуляторов.

В последнее время во всем мире проводятся работы, связанные с освоением Луны. В ИЭС им. Е.О. Патона разрабатывается аппаратура для электронно-лучевой сварки в условиях поверхности Луны при создании долговременных Лунных баз и инфраструктуры для этих сооружений. С учетом особенных физических условий на поверхности Луны, в первую очередь, сверхвысокого вакуума (до  $10^{-13}$  мм рт. ст.), необходимая герметичность соединений наиболее надежно может быть обеспечена только с помощью сварки. Поэтому, создание сварочной аппаратуры и технологий для проведения монтажных и ремонтно-восстановительных работ на поверхности Луны является весьма актуальным при ее освоении человеком. Кроме сверхглубокого вакуума на поверхности имеются и другие физические особенности: резкая смена температур от +140 °С днем и до -170 °С в ночное время, пониженная гравитация (1/6 от гравитации на Земле), лунная пыль (реголиты) и др. Все эти особенности необходимо учитывать при разработке как сварочной аппаратуры, так и при создании вспомогательных устройств — рабочего места оператора. В разрабатываемой конструкции пушки учтены условия формирования электронного пучка в сверхглубоком вакууме, которые значительно отличаются от таковых в наземных вакуумных установках и в околоземном пространстве, в котором летают космические корабли и пилотируемые космические станции.

Мы убеждены, что космическая сварочная аппаратура и технологии, начало которым было положено 50 лет тому назад экспериментом «Вулкан», найдут применение при осуществлении разных проектов при строительстве промышленных комплексов на Земной орбите, освоении Луны и полетах на другие планеты, а также по изучению фундаментальных космических явлений.

Мы убеждены, что космическая сварочная аппаратура и технологии, начало которым было положено 50 лет тому назад экспериментом «Вулкан», найдут применение при осуществлении разных проектов при строительстве промышленных комплексов на Земной орбите, освоении Луны и полетах на другие планеты, а также по изучению фундаментальных космических явлений.



## ГІБРИДНЕ ЛАЗЕРНО-МІКРОПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti–Al–V\*

І.В. Кривцун<sup>1</sup>, В.Ю. Хаскін<sup>2</sup>, В.М. Коржик<sup>1,2</sup>, І.М. Клочков<sup>1</sup>, В.В. Квасницький<sup>3</sup>,  
О.А. Бабич<sup>1,2</sup>, Cai Detao<sup>2</sup>, Luo Ziyi<sup>2</sup>, Han Shanguo<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Китайсько-український інститут зварювання ім. С.О. Патона, Гуанчжоу, КНР

<sup>3</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Досліджено процес гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистового (до 3,0 мм) титанового сплаву Ti–Al–V марки TC4. Визначені рекомендовані технологічні параметри та умови лазерно-мікроплазмового зварювання в середовищі аргону, фізико-механічні властивості зварних з'єднань та встановлено наявність гібридного ефекту. Бібліогр. 5, табл. 3, рис. 7.

*Ключові слова:* лазерно-мікроплазмове зварювання, титановий сплав Ti–Al–V, погонна енергія, міцність, подовження, гібридний ефект

В сучасній промисловості все більше поширення набувають зварні вироби з тонколистових титанових сплавів. Такі вироби характеризуються високою міцністю під дією механічних навантажень, легкістю та високою корозійною стійкістю за умов експлуатації. Прикладами таких виробів можуть бути конструкції, що використовуються в авіакосмічній промисловості, галузі атомної енергетики, хімічній та харчовій промисловості, морській інженерії при експлуатації в умовах морського клімату або підвищеної вологості (наприклад, баки, фільтри) та інше. Широка низка таких конструкцій виготовляється з титанових сплавів товщиною до 3,0 мм із застосуванням стикових зварних з'єднань. Як правило, для вирішення таких завдань використовують контактне, аргонодугове або електронно-променеве зварювання [1].

Однак дані способи зварювання часто не в повній мірі задовольняють вимоги щодо економічності і технологічності виготовлення конструкцій, далеко не завжди дозволяють максимально наблизити фізико-механічні характеристики зварних з'єднань до властивостей основного металу. Високі вимоги щодо геометричної точності виробів з тонколистових титанових сплавів вимагають застосування заходів та технологій отримання з'єднань, які забезпечують мінімальний рівень залишкових зварювальних деформацій. Одним з кращих на сьогоднішній день способів зварювання з позицій мінімізації залишкових деформацій, отримання високоякісних і довговічних зварних з'єднань таких сплавів є електронно-променеве зварювання [2]. Але останнім часом цей метод намагаються замінити

лазерним зварюванням, як більш високопродуктивним і таким, що не потребує використання вакуумних камер [3]. Однак через порівняно високу вартість лазерного обладнання цей спосіб все ще не отримав досить значного поширення. Одним із шляхів зменшення вартості лазерного обладнання є зменшення потужності випромінювання за рахунок часткової його заміни в зварювальному процесі плазмово-дуговою складовою. Такий процес має назву гібридного лазерно-плазмового зварювання [4]. Застосування процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання при збереженні характеристик якості зварних з'єднань на рівні лазерного зварювання відкриває перспективу створення нової прогресивної зварювальної технології. Тому дана робота присвячена дослідженню можливостей гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистових титанових сплавів на прикладі досить поширеного сплаву системи легування Ti–Al–V з товщиною 1,0 та 3,0 мм та є актуальною.

Метою роботи є відпрацювання базових технологічних прийомів гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистового титанового сплаву Ti–Al–V марки TC4 (аналога VT6), вибір рекомендованих технологічних параметрів процесу та умов зварювання, а також визначення фізико-механічних характеристик отриманих з'єднань.

Технологічні дослідження процесу гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання зазначеного титанового сплаву проводили за допомогою установки, описаної в роботі [5], схема інтегрованого гібридного плазмотрона якої наведена на рис. 1. У ході експериментів застосовували дис-

\* Публікується за матеріалами доповіді, представленого на міжнародній конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – POLYWELD 2019», 23–24 травня 2019 р., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

© І.В. Кривцун, В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, І.М. Клочков, В.В. Квасницький, О.А. Бабич, Cai Detao, Luo Ziyi, Han Shanguo, 2019

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) сплаву TC4 виробництва КНР (аналог BT6)

Ti	Fe	C	Si	V	N	Al	Zr	O	H	Домішки
86,45...90,9	≤0,6	≤0,1	≤0,1	3,5...5,3	≤0,05	5,3...6,8	≤0,3	≤0,2	≤0,015	Інших до 0,3

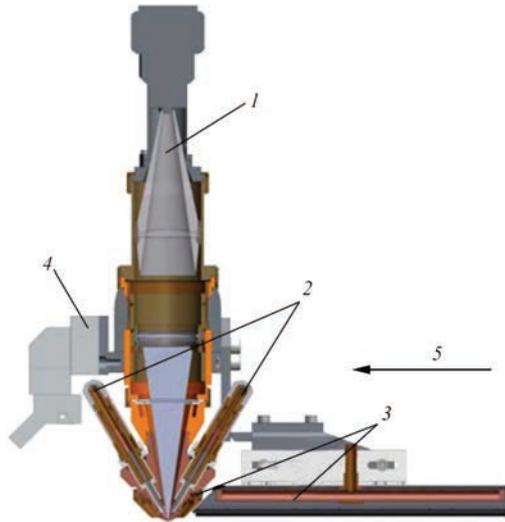


Рис. 1. Схема інтегрованого плазмотрона і проведення експериментів: 1 — подача лазерного випромінювання потужністю  $P = 0,3 \dots 1,2$  кВт; 2 — катодні вузли; 3 — газовий захист; 4 — кріплення на руці робота; 5 — напрямок зварювання

ковий лазер з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1,03$  мкм, потужність якого змінювали в межах  $0,3 \dots 1,2$  кВт. Діаметр фокальної плями становив близько  $0,4$  мм. В застосованому для досліджень інтегрованому коаксіальному плазмотроні прямої дії оригінальної розробки лазерне випромінювання поєднували зі стисненою малоамперною дугою потужністю до  $2,3$  кВт [5]. В цьому плазмотроні сфокусоване лазерне випромінювання та стиснена дуга виводилися спільно через загальне сопло діаметром  $2,5$  мм на зварюваний зразок, розташований на відстані близько  $3$  мм від зрізу сопла. Фокальну площину лазерного випромінювання розташовували на глибині близько  $0,5$  мм щодо поверхні зразка. В експериментах застосовували

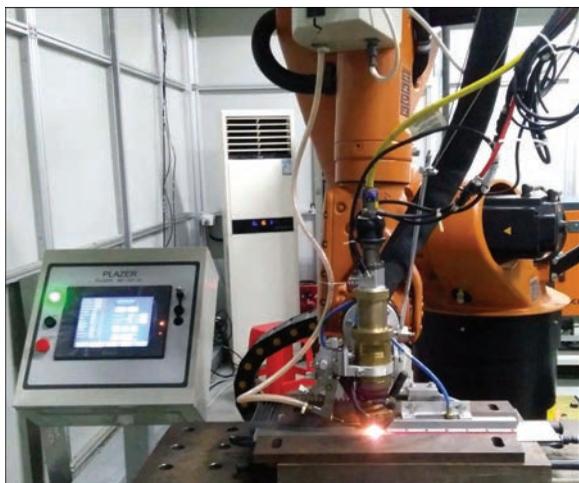


Рис. 2. Процес лазерно-мікроплазмового зварювання інтегрованим плазмотроном, закріпленим в руці робота KUKA KR30HA

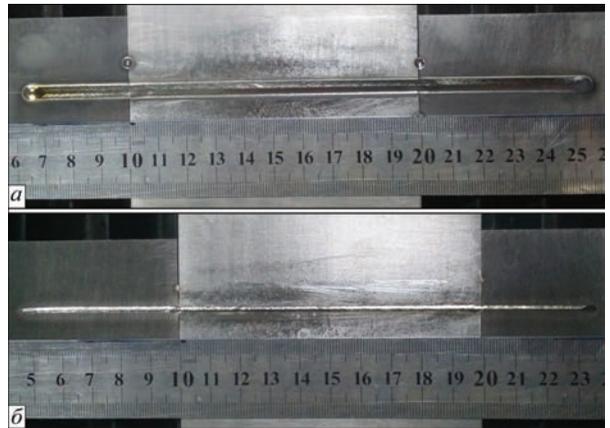


Рис. 3. Зовнішній вигляд пластин титанового сплаву TC4 ( $\delta = 3,0$  мм), зварених встик без зазору між кромками лазерно-мікроплазмовим способом (потужність випромінювання  $P = 1,0$  кВт, зварювальний струм  $I = 50$  А, напруга  $U = 26$  В, швидкість зварювання  $v = 36$  м/год): лицьовий (а) і зворотний (б) боки

електричну дугу безперервної дії прямої полярності. Сила струму дуги інтегрованого мікроплазмотрона плавно регулювалася до  $80$  А при напрузі на дузі до  $28$  В. В якості зразків для зварювання встик і виконання проплавів використовували листи сплаву TC4 розміром  $(200 \dots 300) \times 100 \times \delta$  мм, де  $\delta = 1,0$  і  $3,0$  мм (табл. 1). Переміщення інтегрованого плазмотрона щодо зварюваного зразка здійснювалось за допомогою антропоморфного робота KUKA KR30HA (рис. 2).

Проведені експерименти показали високу стабільність процесу лазерно-мікроплазмового зварювання. У разі гібридного зварювання встик листів титанового сплаву TC4 ( $\delta = 1,0$  і  $3,0$  мм) з зазором між зварюваними кромками до  $0,1$  мм отримані позитивні результати (рис. 3, 4). При цьому гібридний процес перевищив за швидкістю лазерне зварювання на  $30 \dots 40$  % і плазмове зварювання приблизно вдвічі (табл. 2).

В результаті проведення низки експериментів були визначені параметри режимів бездефектного (відсутність підрізів, непроварів і провисань шва) гі-

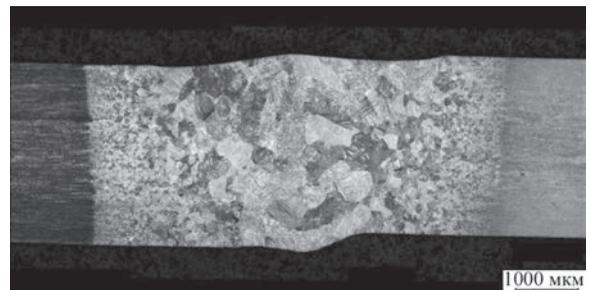


Рис. 4. Макроструктура стикового з'єднання титанового сплаву TC4 ( $\delta = 3,0$  мм), отриманого лазерно-мікроплазмовим зварюванням в захисті аргонем

**Таблиця 2.** Режими і результати лазерного, плазмового і лазерно-мікроплазмового зварювання титанового сплаву ТС4 в захисті аргоном

Номер п/п	$\delta$ , мм	Потужність випромінювання, Вт	Зварювальний струм, А	Напруга на дузі, В	Швидкість зварювання, м/год	Погонна енергія, Дж/мм	Результат
1	1,0	600	40	24	60	80	Гібридне зварювання, провар, наявність підрізів
2	1,0	600	40	24	51	100	Гібридне зварювання, провар, добре формування шва, відсутність підрізів
3	1,0	600	-	-	30	70	Лазерне зварювання, провар, наявність підрізів
4	1,0	-	40	24	24	115	Мікроплазмове зварювання, провар
5	3,0	1200	50	26	42	190	Гібридне зварювання, провар, наявність підрізів
6	3,0	1000	50	26	36	200	Гібридне зварювання, провар, добре формування шва, відсутність підрізів
7	3,0	1000	-	-	24	150	Лазерне зварювання, провар, наявність підрізів
8	3,0	-	50	26	18	210	Мікроплазмове зварювання, провар

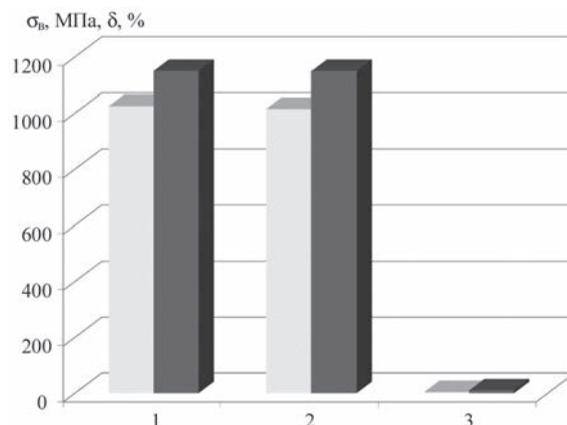
**Таблиця 3.** Режим і результат гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання бездефектного з'єднання титанового сплаву ТС4 ( $\delta = 3,0$  мм)

Режим лазерно-мікроплазмового зварювання			
Потужність лазера $P$ , Вт	1000	Швидкість зварювання $v$ , м/год	36
Струм дуги $I$ , А	50	Зазор від деталі до сопла, мм	3
Витрати плазмоутворюючого газу (аргону) $Q_{пл.}$ , л/хв	10	Витрати додаткового захисного газу (аргону) $Q_{дод.зах.}$ , л/хв	20
Витрати захисного газу (аргону) $Q_{защ.}$ , л/хв	10	Витрати газу (аргону) для захисту кореня шва $Q_{обр.}$ , л/хв	20
Розміри отриманого зварного шва			
Ширина лицевого (верхнього) боку шва, мм	4,8	Ширина зворотного боку шва (кореня), мм	1,5
Опуклість лицевого боку, мм	0,1	Опуклість зворотного боку шва (кореня), мм	0,2

бридного зварювання встик листів титанового сплаву ТС4 із захистом зварювальної ванни і гарячої (понад 200 °С) частини шва аргоном (табл. 3). Згідно з цими параметрами були виконані зварні з'єднання зі сплаву ТС4 товщиною 1,0 і 3,0 мм, з яких потім були виготовлені зразки типу XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996-66) для проведення механічних випробувань.

Для механічних випробувань основного металу і з'єднань зі сплаву ТС4 ( $\delta = 1,0$  і 3,0 мм), зварених встик лазерно-мікроплазмовим способом із захистом аргоном, були вирізані три серії по 3 зразки. За допомогою розривної машини типу MTS Criterion 45 проводили випробування на статичний розтяг стикових швів для визначення межі міцності  $\sigma_b$  (МПа) і відносного подовження  $\delta$  (%). Виміряні для кожної серії зразків результати усереднювали. За отриманими усередненими значеннями побудовані відповідні діаграми (рис. 5). За отриманими результатами було встановлено, що міцність з'єднань титанового сплаву ТС4, отриманих гібридним лазерно-мікроплазмовим зварюванням, становить близько 85...90 % міцності основного металу, відносне подовження зваре-

них таким способом зразків — не набагато більше 40 % від основного металу ( $\delta \approx 4,5$  % для з'єднань при  $\delta \approx 10$  % для основного металу). Для більшості зварювальних завдань наведені показники є задовільними.



**Рис. 5.** Порівняльні результати механічних випробувань зварених лазерно-мікроплазмовим способом зразків з титанового сплаву ТС4 (світло-сірий колір) і основного металу (темно-сірий колір) при їх статичному розтягу: 1, 2 — усереднена межа міцності  $\sigma_b$  (МПа) для зразків товщиною 1,0 (1) та 3,0 (2) мм; 3 — відносне подовження  $\delta$  (%) для всіх випадків

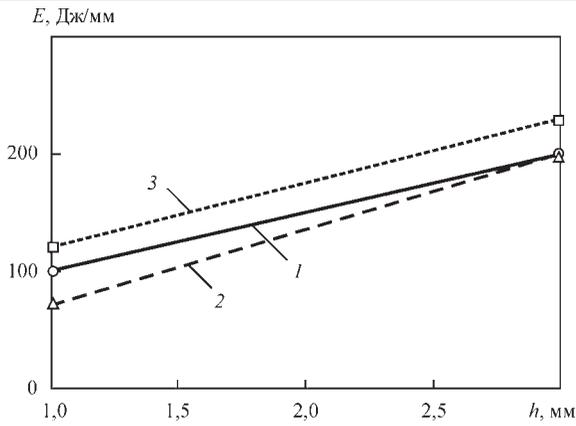


Рис. 6. Залежності погонної енергії  $E$  (Дж/мм) лазерно-мікроплазмового (1), лазерного (2) та плазмового (3) зварювання від товщини  $h$  (мм) зварюваних листів титанового сплаву ТС4

В ході аналізу проведених технологічних досліджень визначали погонну енергію процесу ( $E$ , Дж/мм) як суму потужностей лазерної ( $P$ , Вт) і мікроплазмової ( $0,8IU$ , Вт) складових, віднесено до швидкості зварювання ( $v$ , мм/с). За результатами розрахунків побудовані залежності зміни погонної енергії лазерно-мікроплазмового та лазерного зварювання при однакових швидкостях процесів (рис. 6). Порівняння кривих 1, 2 і 3 показало, що погонні енергії всіх розглянутих зварювальних процесів досить близькі. Можна відзначити, що у всіх випадках плазмовий процес має найбільше енерговкладення, при зварюванні листів товщиною 1,0 мм найменше енерговкладення забезпечує лазерний процес, а у разі зварювання листів товщиною 3,0 мм гібридний і лазерний процеси наближаються один до одного за вкладеною енергією.

Для порівняння результатів лазерного, мікроплазмового та гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання був проведений наступний експеримент. Лазерно-мікроплазмовим способом із захистом аргонном було отримано гарантоване проплавлення пластини зі сплаву ТС4 ( $\delta = 3,0$  мм) на режимі:  $P = 1000$  Вт,  $I = 50$  А,  $U = 26$  В,  $v = 36$  м/год. Потім на тій самій швидкості з тими самими параметрами режиму були виконані два провари — лазерним і мікроплазмовим способами (рис. 7). При цьому сума погонних енергій складових процесів відповідала погонній енергії гібридного зварювання. Дослідження поперечних перерізів цих проварів показало, що глибина гібридного провару приблизно на 25...30 % перевершує суму глибин лазерного і мікроплазмового проварів. Це дозволило зробити висновок про наявність явно вираженого гібридного ефекту в разі лазерно-мікроплазмового зварювання розглянутим способом.

### Висновки

1. В ході даної роботи досліджено гібридне лазерно-мікроплазмово зварювання тонколистового ти-

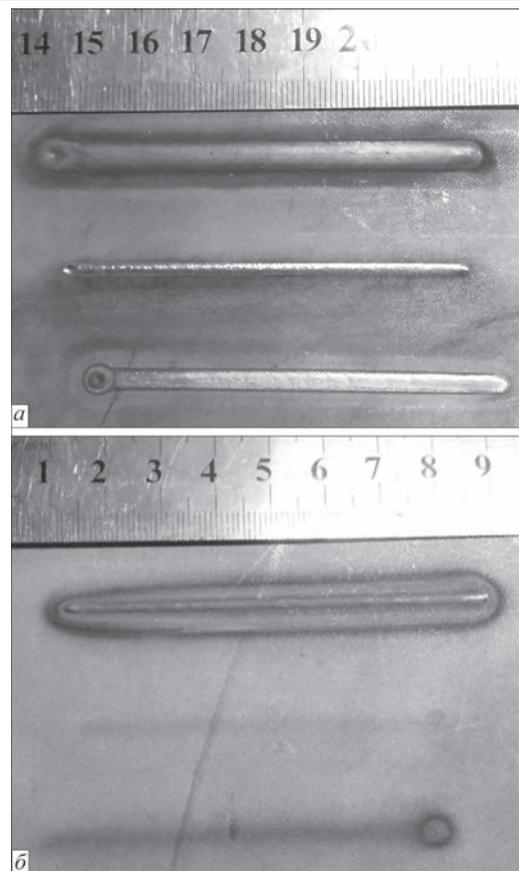


Рис. 7. Зовнішній вигляд лицьового (а) і зворотного (б) боків проварів в пластині зі сплаву ТС4 товщиною  $\delta = 3,0$  мм (зверху вниз): гібридний, лазерний, мікроплазмовий

танового сплаву ТС4 із захистом аргонном. Визначено, що в разі стикування зварюваних кромок із зазором до 0,1 мм гібридне зварювання дозволяє отримувати якісні з'єднання без необхідності використання присаджувального дроту, без підрізів і провисань, характерних для лазерного зварювання. При цьому швидкість гібридного процесу перевищує швидкість лазерного на 30...40 %, а плазмового — приблизно вдвічі.

2. Аналіз результатів механічних випробувань зварних з'єднань титанового сплаву ТС4, отриманих гібридним лазерно-мікроплазмовим зварюванням, свідчить, що їх міцність на статичний розтяг становить близько 85...90 % від міцності основного металу, а відносно подовження — понад 40 %. Для більшості зварювальних завдань наведені показники є задовільними.

3. Зіставлення погонних енергій розглянутих зварювальних процесів показало достатню близькість їх величин. У всіх випадках плазмовий процес має найбільше енерговкладення. При зварюванні листів товщиною 1,0 мм найменше енерговкладення забезпечує лазерний процес, а у разі зварювання листів товщиною 3,0 мм гібридний і лазерний процеси порівнюються за вкладеною енергією.

4. Порівняльні дослідження проварів, виконаних на зразках зі сплаву ТС4 лазерним, мікроплазмовим і гібридним способами показали, що глибина провару при гібридному способі приблизно на 25...30 % перевершує суму глибин лазерного і мікроплазмового проварів. При цьому сума погонних енергій складових процесів відповідає погонній енергії гібридного зварювання. Це свідчить про наявність гібридного ефекту в разі застосування лазерно-мікроплазмового зварювання.

*Примітка.* Роботу виконано в межах проекту № 2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Науково-дослідні розробки лазерних і плазмових технологій гібридного зварювання і різання)», Guangzhou, China, а також в межах спеціального проекту № 2017GDASCX-0411 Capacity — Building of Innovation — Driven Development for Special Fund Projects Програм Академії наук провінції Гуандун (КНР) «Дослідження фізико-хімічних процесів при взаємодії парової плазми з поверхнею металів і розробка наукових основ технології водо-повітряного плазмового різання листових сталей для одержання зв'язаних з'єднань».

## Список літератури

1. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. 2-е изд., доп. и перераб. Киев, Наукова думка.
2. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. (1988) *Лазерная техника и технология*. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов. Учеб. пособие для вузов. Григорьянц А.Г. (ред.). Москва, Высшая школа.
4. Кривцун И.В., Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. и др. (2007) Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 49–53.
5. Кривцун И.В., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю. и др. (2017) Установка нового поколения для лазерно-микроплазменной сварки. *Сб. докл. Восьмой между. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*. Кривцун И.В. (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», 2017, сс. 95–100.

## References

1. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. 2nd Ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) *Electron beam welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N. (1988) *Laser technique and technology*. In: 7 books. Book 5: Laser welding of metals. In: Manual for higher education inst. Ed. by A.G. Grigoryants. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
4. Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, 5, 36-40.
5. Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu. et al. (2017) Unit of new generation for laser-microplasma welding. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Processing of Materials*. Ed. by I.V. Krivtsun. Kiev, International Association Welding, 2017, 95-100.

## ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Тi–Al–V

И.В. Кривцун<sup>1</sup>, В.Ю. Хаскин<sup>2</sup>, В.Н. Коржик<sup>1,2</sup>, И.Н. Клочков<sup>1</sup>, В.В. Квасницкий<sup>3</sup>,  
О.А. Бабич<sup>1,2</sup>, Cai Detao<sup>2</sup>, Luo Ziyi<sup>2</sup>, Han Shanguo<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>Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона, Гуанчжоу, КНР

<sup>3</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Исследован процесс гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистового (до 3,0 мм) титанового сплава Ti–Al–V марки ТС4. Определены рекомендованные технологические параметры и условия лазерно-микроплазменной сварки в среде аргона, физико-механические свойства сварных соединений и установлено наличие гибридного эффекта. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 7.

*Ключевые слова:* лазерно-микроплазменная сварка, титановый сплав Ti–Al–V, погонная энергия, прочность, удлинение, гибридный эффект

## HYBRID LASER-MICROPLASMA WELDING OF TI-AL-V TITANIUM ALLOY

I.V. Krivtsun<sup>1</sup>, V.Yu. Haskin<sup>2</sup>, V.M. Korzhik<sup>1,2</sup>, I.M. Klochkov<sup>1</sup>, V.V. Kvasnytskyi<sup>3</sup>,  
O.A. Babich<sup>1,2</sup>, Cai Detao<sup>2</sup>, Luo Ziyi<sup>2</sup>, Han Shanguo<sup>2</sup>

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>E.O. Paton Chinese-Ukrainian Welding Institute. Guangzhou, China

<sup>3</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37, Pobedy Ave., Kiev-56, Ukraine

The process of hybrid laser-micro-plasma welding of thin-sheet Ti-Al-V titanium alloy of TS4 grade (up to 3.0 mm) was investigated. The recommended technological parameters and conditions of laser-plasma welding in argon medium, physical and mechanical properties of welded joints were determined, and the presence of hybrid effect was established. 5 Ref., 3 Tabl., 7 Fig.

*Keywords:* laser-microplasma welding, Ti-Al-V titanium alloy, input energy, strength, elongation, hybrid effect

Поступила в редакцию 01.07.2019

# INFLUENCE OF LASER POWER AND WELDING VELOCITY ON THE MICROSTRUCTURE OF Zr-BASED BULK METALLIC GLASS WELDED JOINTS\*

Haiyan Wanga<sup>1</sup>, Ma Yanyib<sup>2</sup>, Zhang Yupenga<sup>1</sup>, Dong Chunlina<sup>1</sup>, Yi Yaoyonga<sup>1</sup>, Xi Huaia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870, China

Laser welding is employed to weld  $Zr_{67.8}Cu_{24.7}Al_{3.43}Ni_{4.07}$  bulk metallic glass, and the effects of laser power and welding velocity on the microstructures of bulk metallic glass joints are studied. Owing to the high speed and high-energy density of laser welding, the weld fusion zones remain amorphous structure. Some nano-grains are formed in weld fusion zones and of benefits for the improvement of microhardness. Crystallization happens in heat-affected zone and deteriorates the hardness of materials. The joint welded with laser power of 600 W and velocity of 110 mm/s exhibits the lowest degree of crystallization. Larger laser power or slower welding speed would cause excessive heat accumulation in heat-affected zone. 10 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

*Keywords:* Bulk metallic glass; laser welding; microstructure; crystallization

**Introduction.** Zr-based bulk metallic glass (BMG) with specific long-range disordered structure have many promising merits [1], such as high strength, high hardness, and excellent corrosion resistance, etc. These outstanding properties make them promising candidates for potential applications in the field of consumer electronics, medical apparatus, automobile industry and so on. However, as BMGs belong to metastable materials, the relatively weak glass forming ability and the demand for quenching process limits their development of large-scale products. Therefore, to extend the engineering applications, many researches on various welding technologies for BMGs have been carried out, including friction stir welding, explosion welding, and diffusion welding, etc. Among these technologies, laser welding has attracted extensive interests owing to their superiorities of fast welding velocity, deep welding penetration and high energy density [2]. It can fulfill the demands of BMGs' welding for high solidification and thermal quench rate in both weld fusion zone (WFZ) and heat-affected zone (HAZ). Li, Kim and Kawahito et al. utilized laser or pulsed laser welding to realize  $Zr_{45}Cu_8Al_7$ ,  $Cu_{54}Ni_6Zr_{22}Ti_{18}$  and  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  BMGs joints, respectively [3–5]. The reported studies reveal that crystallization easily happens in WFZ and HAZ, so it is critical to control the laser energy input to prevent heat accumulating in welding zone, which depends on the two significant parameters in laser welding, i.e., laser power and welding velocity.

\* Based on presentation made at Conference «Polyweld-2019» (23–24 May 2019), NTUU «Igor Sikorsky KPI».

Herein, this work used laser beam to weld  $Zr_{67.8}Cu_{24.7}Al_{3.43}Ni_{4.07}$  BMGs. The influences of laser power and welding velocity on the microstructure of welding joints were studied and the optimal parameters were obtained to realized high-quality  $Zr_{67.8}Cu_{24.7}Al_{3.43}Ni_{4.07}$  BMG joints.

**Experimental.** The  $Zr_{67.8}Cu_{24.7}Al_{3.43}Ni_{4.07}$  BMGs with sizes of 60 mm×20 mm×1 mm were prepared by arc melting Zr, Cu, Al and Ni metals with a purity above 99.9 %. Before welding, the BMGs were polished by 2000 mesh silicon carbide papers, and cleaned by absolute ethyl alcohol to remove the oxide and residues on welding surface. Then, the BMG plates were welded by TRUMPF TRU DISK10002. The movement of laser beam was controlled by TRUMPF PFO 33, and the diameter of focus spot was about 0.2 mm. Five samples with various laser powers and welding velocities were obtained. Table shows their corresponding parameters in detail.

After welding, the samples were cut along the direction perpendicular to the weld, and inlaid, polished and polished successively. The cross-sectional surfaces were etched by chemical solvent of 3 ml HF, 50 ml HNO<sub>3</sub> and 60 ml H<sub>2</sub>O.

The microstructures of BMG welding joints were characterized by optical microscopy (OM, ZEISS

**Table.** Welding parameters for  $Zr_{67.8}Cu_{24.7}Al_{3.43}Ni_{4.07}$  BMGs

Sample No.	Laser Power P (W)	Welding velocity (mm/s)
1	600	90
2	600	100
3	600	110
4	570	100
5	630	100

Ario Imager.M2m). The Vickers hardness of WFZ and HAZ was evaluated by micro-hardness tester (Buehler VH1202) with load and dwell time of 1 kg and 10 s, respectively. The glassy or crystalline structures were identified by transmission electron microscopy (TEM, FEI Titan G2 300).

**Results and discussion.** Figures 1, *a–e*, show the cross-sectional microstructures and morphology of samples 1 to 5, respectively. The three zones of WFZ, HAZ and unaffected base material (BM) can be clearly identified according to the contrasting differences, which are signed in the figures, respectively. As can be observed in Fig. 1, *b* to *e*, there are some little pores existing in WFZs, which is mainly caused by the key hole formed during laser welding. As for the microstructures of HAZ, the bright spots are corresponding to the crystallization area, and its proportion can be utilized to evaluate the degree of crystallization [4, 6, 7].

Generally, sample 3 which is welded under laser power and velocity of 600 W and 110 mm/s, respectively, shows the weakest degree of crystallization. To study the effect of welding velocity on the crystallization, samples 1, 2 and 3 are compared. It is obvious that as the welding velocity increases from 90 mm/s to 110 mm/s, the crystallization is successively weakened. This is owing to the relatively larger welding velocity, which is beneficial to promote the heat conduction and thermal quench happening in HAZ [6]. As for the influence of laser power, samples 2, 4 and 5 are taken into considerations. As can be seen from Fig. 1, *d*, when the laser power is 570 W, the bottom of the weld is incompletely fused, indicating that the input energy is too low to weld. As the laser power increases to 600 and 630 W, the BMG joints become completely fused, but the degree of crystallization also gets

worse and exhibit the largest crystallization area of sample 5.

To understand the difference of microstructures between glassy WFZ and crystalline HAZ, bright-field TEM (BFTEM) and high-resolution TEM (HRTEM) characterizations are employed. Fig. 2, *a* and *c* show the typical BFTEM and HRTEM images of HAZs, respectively. Many grains as well as grains boundaries can be observed, and the HRTEM result exhibiting ordered lattice further verifies the crystalline structure of HAZ. Fig. 2, *b* and *d* are the typical BFTEM and HRTEM results for WFZs, respectively. Different from Fig. 2, *a*, only several nano-grains are identified in Fig. 2, *b*. The HRTEM image shown in Fig. 2, *d* reveals that the microstructure of WFZ is generally amorphous, and the nano-grain is with a size of about 80 nm in circumscribed circle diameter. The formation of such nano-grains is ascribed to the high speed and high-energy density of laser welding [8], which results in the increasing nucleation rate and quickly drop of temperature during welding to retard grain growth. These nano-grains are regarded as the key to improving the mechanical properties of materials [9, 10], including hardness, strength, plasticity, etc.

To evaluate the mechanical properties of as-welded BMG joints, the Vickers hardness of difference zones for samples 1 to 5 is tested by a micro-hardness tester under the force of 1 kg and dwell time of 10 s, as shown in Fig. 3, *a*. Fig. 3, *b* displays the typical indentation for each test. According to Fig. 3, *a*, the hardness of WFZ as 514~523 *HV* is generally higher than that of BM as 507~509 *HV*, which is attributed to the nano-crystallization happening in WFZ, as revealed in Fig. 2, *d*. On the contrary, the hardness of HAZ is greatly decreased to 436, 456.9, 477.4, 491.3 and 500.2 *HV* for samples

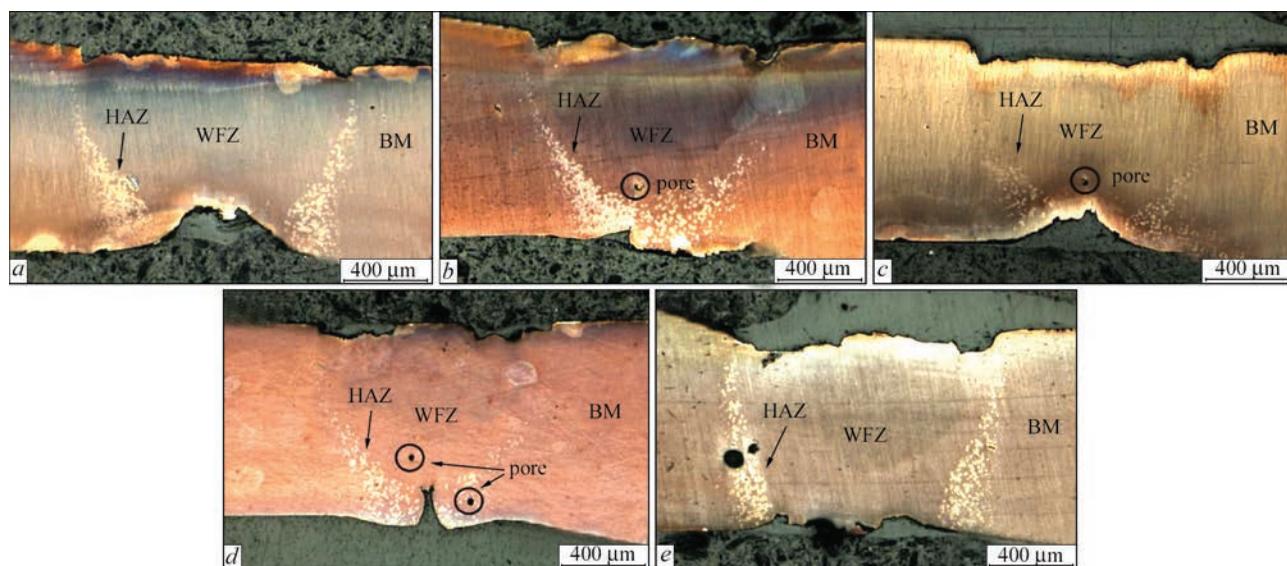


Fig. 1. Optical microscopy images for the cross-sections of the welds taken from *a–e* samples 1–5

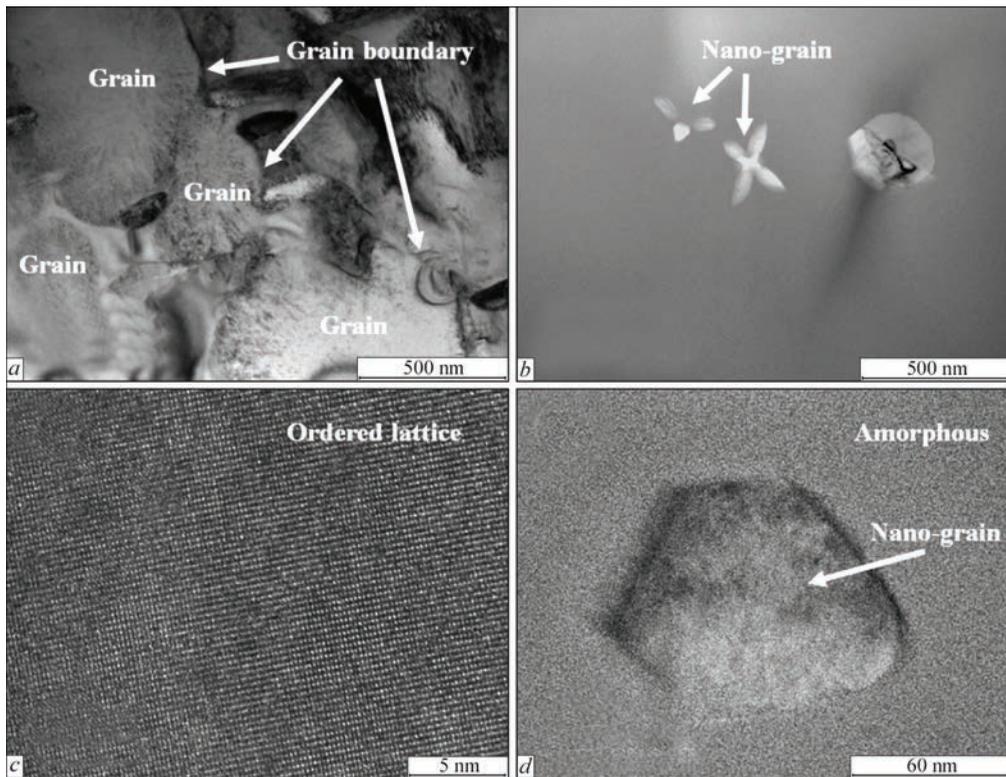


Fig. 2. Typical BFTEM images of (a) HAZs and (b) WFZs, and the corresponding HRTEM images of (c) HAZs and (d) WFZs for these samples

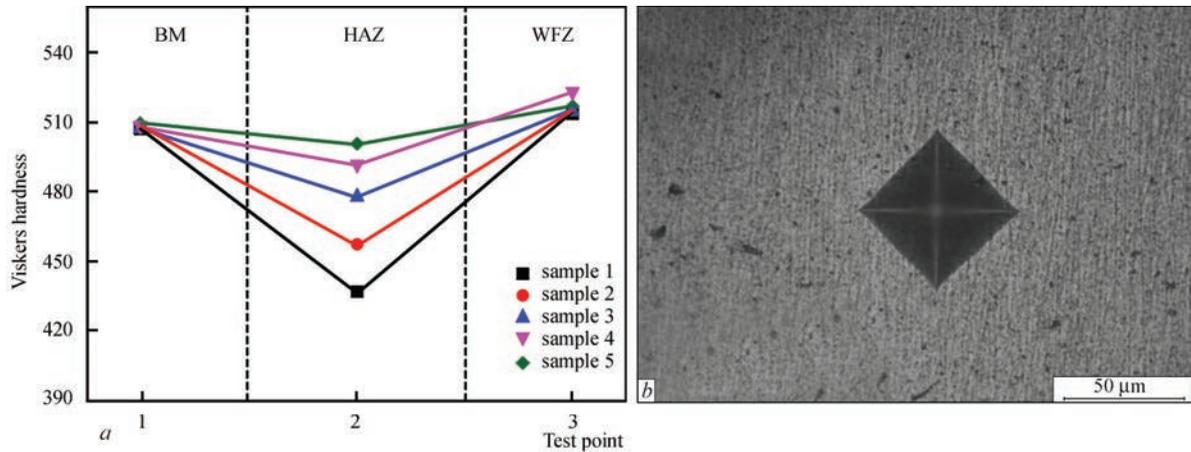


Fig. 3. Vickers hardness of different zones for samples 1 to 5, and test point of 1, 2 and 3 are corresponding to BM, HAZ and WFZ, respectively (a), the image of typical indentation for each test (b)

1 to 5, respectively. It is considered that the severe thermal crystallization during welding is the main reason for this sharply weakened hardness in HAZ.

**Conclusions.** In summary,  $Zr_{67.8}Cu_{24.7}Al_{3.43}Ni_{4.07}$  BMGs were welded by laser welding, and the effects of laser power and welding velocity on the microstructure, especially the crystallization behavior, of BMG joints were studied. The WFZs' microstructure of all samples remain amorphous generally, but several nano-grains are formed, which is advantageous to improve the Vickers hardness of WFZ. As for HAZ, the joint welded with laser power of 600 W and velocity of 110 mm/s exhibits the lowest degree of crystallization. Larger laser power

or slower welding speed would cause excessive heat accumulation in HAZ, and, therefore, result in severe crystallization reaction and deterioration of the mechanical properties of BMG materials.

**Acknowledgments**

This work is supported by the following grants: GDAS's Project of Constructing Domestic First-class Research Institutions (2019GDASYL-0103075), GDAS's Project of Science and Technology Development (2017GDASCX-01), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2014B070705007) and Science and Technology Planning Project of Guangzhou (ZWY201704002).

References

- Williams E., Lavery N. (2017) Laser processing of bulk metallic glass: A review. *Journal of Material Processing Technology*, **247**, 73-91.
- Wang H.S., Chen H.G., Jang J.S.C., Chiou M.S. (2010) Combination of a Nd:YAG laser and a liquid cooling device to (Zr<sub>53</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>9</sub>Al<sub>8</sub>)Si<sub>0.5</sub> bulk metallic glass welding. *Materials Science & Engineering A*, **528**(1), 338-341.
- Kawahito Y., Terajima T., Kimura H., Kuroda T., Nakata K. (2008) High-power fiber laser welding and its application to metallic glass Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub>. *Materials Science & Engineering B*, **148**(1), 105-109.
- Li B., Li Z.Y., Xiong J.G., Xing L., Wang D., Li Y. (2006) Laser welding of Zr<sub>45</sub>Cu<sub>48</sub>Al<sub>7</sub> bulk glassy alloy. *Journal of Alloys & Compounds*, **413**(1), 118-121.
- Kim J.H., Lee C., Lee D.M., Sun J.H., Shin S.Y., Bae J.C. (2007) Pulsed Nd:YAG laser welding of Cu<sub>54</sub>Ni<sub>6</sub>Zr<sub>22</sub>Ti<sub>18</sub> bulk metallic glass. *Materials Science & Engineering A*, **449**(13), 872-875.
- Wang G., Huang Y.J., Shagiev M., Shen J. (2012) Laser welding of Ti<sub>40</sub>Zr<sub>25</sub>Ni<sub>3</sub>Cu<sub>12</sub>Be<sub>20</sub> bulk metallic glass. *Materials Science and Engineering A*, **541**, 33-37.
- Wang H.S., Chen H.G., Jang S.C. (2010) Microstructure evolution in Nd:YAG laser-welded (Zr<sub>53</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>9</sub>Al<sub>8</sub>)Si<sub>0.5</sub> bulk metallic glass alloy. *Journal of Alloys & Compounds*, **495** (1), 224-228.
- Chen B., Shi T.L., Li M., Yang F., Yan F., Liao G.L. (2014) Laser welding of annealed Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> bulk metallic glass. *Intermetallics*, **46**(3), 111-117.
- Siegel R.W. (1993) Nanostructured materials-mind over matter. *Nanostructured Materials*, **3**(1), 1-18.
- Karch J., Birringer R., Gleiter H. (1987) Ceramics ductile at low temperature. *Nature*, **330** (6148), 556-558.

ВПЛИВ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРА ТА ШВИДКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ НА МІКРОСТРУКТУРУ НАСИПНОЇ МАСИ НА ОСНОВІ ЦИРКОНІЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З МЕТАЛЕВОГО СКЛА

Haiyan Wang<sup>1</sup>, Ma Yanyib<sup>2</sup>, Zhang Yupenga<sup>1</sup>, Dong Chunlina<sup>1</sup>, Yi Yaoyonga<sup>1</sup>, Xi Huaia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Провінційна ключова лабораторія прогресивних технологій зварювання Гуандун, Інститут зварювання Гуандун (Китайсько-Український інститут зварювання ім. С.О. Патона, ), 510650, Гуанчжоу, Китай

<sup>2</sup>Школа матеріалознавства та техніки, Шеньянський технологічний університет, Шеньян, 110870, Китай

Лазерне зварювання застосовується для зварювання об'ємного металевго скла Zr<sub>67.8</sub>Cu<sub>24.7</sub>Al<sub>3.43</sub>Ni<sub>4.07</sub>, а також вивчається вплив потужності лазера та швидкості зварювання на мікроструктури швів об'ємного металевго скла. Завдяки високій швидкості та високоенергетичній щільності лазерного зварювання, зони злиття зварного шва залишаються аморфною структурою. Деякі нанозерна утворюються у зоні злиття зварного шва і приносять користь для поліпшення мікротвердості. Кристалізація відбувається в зоні ураження теплом і погіршує твердість матеріалів. Шар, зварений потужністю лазера 600 Вт і швидкістю 110 мм/с, демонструє найнижчий ступінь кристалізації. Більша потужність лазера або менша швидкість зварювання можуть спричинити надмірне накопичення тепла в зоні ураження теплом. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: наливне металеве скло, лазерне зварювання, мікроструктура, кристалізація

Надійшла до редакції 01.07.2019

Ежегодная конференция-выставка «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2020»

Май 2020 г.

Место проведения Конференции:  
г. Киев, ул. Набережно-Луговая, 8

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Секции:



Железная дорога: вагонное, локомотивное и путевое хозяйство



Энергетика, нефтегазовая и химическая отрасли



Металлургия, машиностроение



Авиационное и техническое обслуживание летательных аппаратов



Семинар по обмену опытом между Органами по сертификации персонала (ОСП) в области НК, Учебными и Аттестационными центрами

Доклады, презентации, демонстрация приборов и систем неразрушающего контроля, разработанных предприятиями «Ассоциации «ОКО».

Организатор «Ассоциация «ОКО»



## ВПЛИВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

**Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, В.С. Сенчишин, М.В. Шарик, В.Я. Гаврилюк**

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя МОН України.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, E-mail: Viktor\_Synchyshyn@i.ua

Проведено дослідження зносостійкості та стабільності товщини шару металу, наплавленого індукційним методом. Показано, що при наплавленні порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 нагрівальною системою ІТЕЕ (індуктор, тепловий і електромагнітний екрани) з прикладанням горизонтальної вібрації і енергоощадного режиму наплавлення, зносостійкість підвищується в 1,4 рази, стабільність товщини шару наплавленого металу на 10 % та покращується якість наплавленого металу (з крупнозернистої структури в дрібнозернисту) в порівнянні з технологією без горизонтальної вібрації. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова: індукційне наплавлення, тонкі сталеві диски, горизонтальна механічна вібрація, мікроструктура, зносостійкість, тепловий та електромагнітний екрани, енергоощадний режим*

Одним із актуальних напрямків в області науки і техніки є модифікація поверхні конструкційних та інструментальних сталей з метою підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів, які працюють в умовах підвищеного спрацювання та агресивних середовищах. Сьогодні на підприємствах машинобудівної та металооброблювальної промисловості широко застосовуються різні методи модифікації поверхні, такі як нанесення зносостійких покриттів фізичними і хімічними методами, різні види хіміко-термічного оброблення.

Серед фізичних методів формування функціональних покриттів спосіб індукційного наплавлення є найбільш ефективним для нанесення шару багатокомпонентних матеріалів. В даний час одним із найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності зносостійких покриттів є введення додаткових технологічних операцій в традиційний спосіб індукційного наплавлення, таких як екранування теплових і електромагнітних полів, режими наплавлення з економією електроенергії, піддавання виробу в процесі наплавлення горизонтальній та вертикальній механічній вібрації і т.д., які дозволяють значно підвищити експлуатаційні властивості наплавленого шару металу.

Індукційне наплавлення – це процес, який використовується для відновлення спрацьованих, або зміцнення робочих поверхонь при виготовленні нових деталей [1, 2]. Даний процес наплавлення набув широкого застосування у сільськогосподарському машинобудуванні [3]. Важливою умовою для забезпечення якісного процесу наплавлення є правильно підібрані параметри режи-

му наплавлення, що в подальшому впливають на якість наплавленого шару металу, а отже і на довговічність експлуатації наплавленої деталі.

При індукційному наплавленні використовуються теплові та електромагнітні екрани, для ізоляції тих поверхонь деталей, які підлягають небажаному нагріванню. Застосуванням теплових і електромагнітних екранів при індукційному нагріванні присвячено ряд робіт [4–6]. Екрани використовуються в різних технологічних процесах для загартування деталей, наплавлення і т. д. Зазвичай вони використовуються роздільно (тобто тільки електромагнітний або тепловий екран). При цьому дуже складно регулювати температуру в зоні наплавлення для отримання якісного шару наплавленого металу.

Для покращення властивостей наплавленого металу авторами розроблена нова технологія наплавлення із застосуванням нагрівальної системи ІТЕЕ (індуктор, тепловий та електромагнітний екрани) [7, 8], тобто комбіноване одночасне екранування теплових і електромагнітних полів, що дозволяє досягати більш стабільної товщини шару наплавленого металу за рахунок рівномірної температури в зоні наплавлення, оскільки порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу за рахунок теплопередачі, зі змінною питомою потужністю в часі при наплавленні (енергоощадний режим нагрівання) [9].

Представляє інтерес дослідження властивостей наплавленого шару металу у випадку, коли в систему ІТЕЕ і при використанні енергоощадного режиму наплавлення ввести додаткову технологічну операцію, як, наприклад, горизонтальну

механічну вібрацію деталі, яка підлягає наплавленню, в момент початку плавлення порошкоподібного твердого сплаву до повного його розплавлення і охолодження [10, 11], що дозволить значно покращити експлуатаційні характеристики наплавленого шару металу.

**Методика досліджень.** Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі М-400 фірми «Леко». Мікроструктуру досліджуваних зразків вивчали на мікроскопі НЕОФОТ-32 (Німеччина). Травлення зразків, наплавлених зносостійким сплавом ПГ-С1, проводили електrolітичним способом в 20 %-му водному розчині хромового ангідриду напругою  $U = 20$  В, час витримки  $\tau = 5$  с.

Аналіз елементного складу наплавлених зразків проводили на мікроаналізаторі SX-50 (Камебакс) фірми «Камека». Випробування зносостійкості наплавленого металу проводили на машині НК-М [12].

Результати досліджень виражали у вигляді відносної зносостійкості, яка дорівнює відношенню втрати маси еталону до втрати маси досліджуваних зразків.

Наплавлення здійснювалось одночасно по всій робочій поверхні за допомогою генератора типу ВЧИ-63/0,44 із застосуванням механічної горизонтальної вібрації за енергоощадним режимом нагрівання, регулювання яким здійснювалось за допомогою пристрою [13].

Дослідження процесу індукційного наплавлення тонких дисків проводили за допомогою на-

грівальної системи (ІТЕЕ) (рис. 1) [14], яка складається з верхньої 8 і нижньої 6 притискних плит, а також приводу 9 для піднімання верхньої плити 8. Деталь 3 з попередньо насипаною на неї шихтою 10 твердого сплаву ПГ-С1 встановлювалась у двовитковий кільцевий індуктор, 1 — верхній, 2 — нижній виток. На торці диска і нижній його поверхні, протилежній наплавленню, по периметру розташовано тепловий екран 4, а також на торці диска встановлено електромагнітний екран 5, які між собою з'єднані жорстко і закріплені до нижньої плити. Електромагнітний і тепловий екрани виконані з можливістю вертикального переміщення відносно торця диска 3 і витків індуктора 1 і 2 за допомогою приводу 7, закріпленого на нижній плиті 6, що дає можливість регулювати температурне поле в зоні наплавлення, оскільки при індукційному напавленні порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу.

Дослідження наплавленого металу, отриманого за допомогою нагрівальної системи ІТЕЕ із використанням горизонтальної вібрації, проводили на мікроструктуру, товщину шару наплавленого металу і зносостійкість з метою забезпечення наплавленого валика шириною 10...50 мм і товщиною відповідно 0,8...1,5 мм.

Отримані результати порівнювали з результатами, отриманими нагрівальною системою без використання горизонтальної вібрації.

При цьому використовували диски, які виготовлені зі сталі Ст3 товщиною 3 мм і порошко-

**Таблиця 1.** Хімічний склад (мас. %) порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1

Наплавлюваний матеріал	C	Cr	Si	Ni	Mn	B	Cu	W	Fe	Твердість наплавлюваного металу HRC
Порошок										
ПГ-С1 сормайт №1 (У30Х28Н4С4)	2,5...3,3	27...31	2,8...4,2	3,0...5,0	0,4...1,5	-	-	-	Основа	51

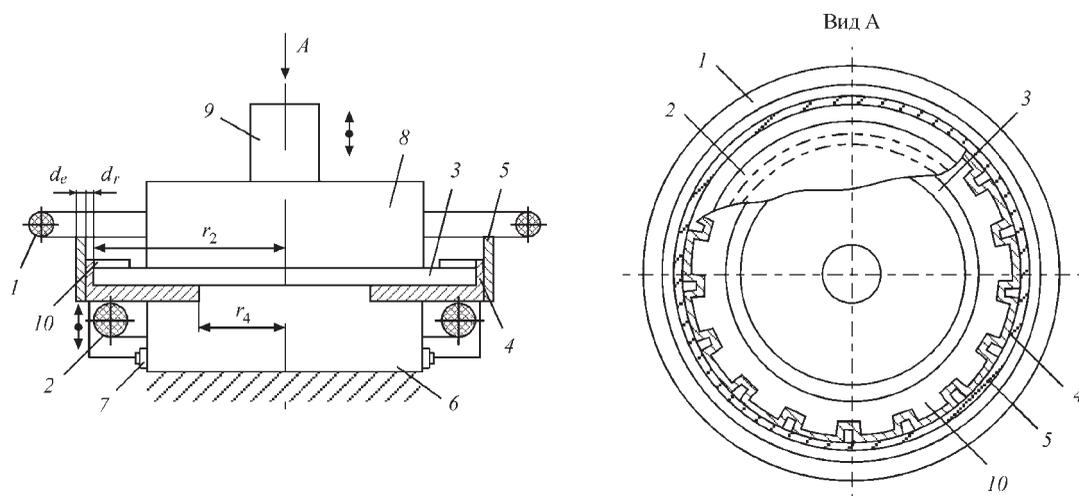


Рис. 1. Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення з жорстко з'єднаними між собою тепловим і електромагнітним екранами (опис 1–10 див. у тексті)

подібний твердий сплав ПГ-С1, хімічний склад якого приведений в табл. 1.

В табл. 2 представлені нагрівальні системи і параметри нагрівання при енергоощадному режимі наплавлення [9].

Процес індукційного наплавлення здійснювався одночасно по всій робочій поверхні від генератора типу ВЧИ-63/0,44 без обертання деталі. Технічні характеристики генератора з застосуванням горизонтальної вібрації такі ж самі, як і без вібрації, у початковий момент часу складали: напруга на контурі 2,2 кВ; напруга на аноді лампи 8,3 кВ; струм сітки лампи 3,6 А; струм анода лампи 1,1 А; час наплавлення всієї робочої поверхні диска складав 22 с. Процес здійснювали без перемикавання генератора, тобто питома потужність на індукторі змінювалась за енергоощадним режимом, який має вигляд [9] і визначається за формулою

$$W_{\text{до}} = \frac{\lambda_g m^2}{s k (a m^2 \tau)} T_{\text{до}} e^{a m^2 \tau}$$

де  $T_{\text{до}}$  — температура, при якій здійснюється якісне наплавлення, яка досягається за час  $\tau$ ;  $\lambda_g = ca\gamma$ , Вт/(м·°C);  $c$  — питома теплоємність,  $a$  — температуропровідність, м<sup>2</sup>/с;  $\gamma$  — густина, кг/м<sup>3</sup>;  $m^2 = Bi/2h^2$ ;  $Bi = 2ha/\lambda$  — критерій Біо;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності матеріалу диска, Вт/(м·°C);  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t$  — плинний час;  $\tau$  — час наплавлення.

Кінцеві параметри режиму наплавлення склали відповідно 7,0, 10,0, 0,95, 3,1. Питома потужність без вібрації і з вібрацією відповідно в початковий момент складала  $W_1 = 0,12 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> і в кінці наплавлення  $W_2 = 0,43 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> (див. табл. 2).

Розглянемо металографічні дослідження шару наплавлюваного металу, одержаного за допомогою нагрівальної системи (ІТЕЕ) із використанням горизонтальної вібрації і без вібрації.

Дослідження проводились для двох випадків індукційного наплавлення із застосуванням та без застосування механічної вібрації. Для дослідження структури і зносостійкості наплавленого металу із наплавлених заготовок вирізали зразки. Травлення зразків для проведення металографічних досліджень проводили поетапно, електролітичним способом у 20%-му розчині хромової кислоти (напруга 20 В і час витримки 10 с), визначали структуру наплавленого металу — хімічним травленням в 4%-му розчині азотної кислоти.

Мікроструктура основного металу являє собою ферит і перліт, а мікроструктура наплавленого металу досліджуваних зразків складається з первинних карбідів (комплексні карбіди типу (Fe, Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> і (Fe, Cr)<sub>3</sub>C) у вигляді великих пластин віялоподібної форми, які мають гексагональну ґратку із чіткою межею з'єднання з матрицею карбідної евтектики та матричної аустенітної структури.

Надлишкові карбіди, як правило, розташовуються у вигляді окремих пластинчастих виділень в центральній частині по ширині і товщині наплавленого валика. Прямокутні і шестигранні виділення — це карбіди різної дисперсності, частина з них — надлишкові пластинчасті карбіди, які достатньо рівномірно розподілені в матриці. Мікротвердість карбідів змінювалась в межах HV 0,5 – 11710...12830 МПа.

Спільним для двох варіантів наплавленого металу є:

наявність в наплавленому шарі доевтектичної зони, яка прилягає до лінії з'єднання і характеризується формуванням дендритів твердого розчину (легованого аустеніту) з осями першого і другого порядку, а також карбідної евтектики, що кристалізується в міждендритному просторі. Мікротвердість аустеніту для зразка без застосування горизонтальної вібрації становила HV 0,5 –

Таблиця 2. Нагрівальні системи і режими наплавлення

Нагрівальні системи	Режими наплавлення					Тип генератора	Характер зміни питомої потужності на індукторі $W \cdot 10^{-9}$ , Вт/м <sup>3</sup>
	Напруга на контурі, кВ	Анодна напруга, кВ	Струм сітки лампи, А	Струм анода лампи, А	Час наплавлення, с		
Без використання та з використанням горизонтальної вібрації	Змінні					ВЧИ –63/0,44	
	вхідні чисельник (τ = 0 с)			вихідні знаменник (τ = 22 с)			
	2,2 7,0	8,3 10,0	3,6 0,95	1,1 3,1	22		



Рис. 2. Мікроструктура (×200) наплавленого металу зразків: *a* — без вібрації; *б* — із застосуванням горизонтальної вібрації

4550...5140 МПа та  $HV_{0,5}$  – 5150...5900 МПа для зразка із горизонтальною вібрацією. Крім того, виявлена структурна неоднорідність вздовж лінії з'єднання з боку сормаїту ПГ-С1, яка полягає в тому, що доевтектична дендритна зона розподілена нерівномірно;

утворення граничної білої смужки твердого розчину (легованого аустеніту) між наплавленим і основним металом змінної ширини 10...20 мкм для зразка без вібрації з мікротвердістю  $HV_{0,5}$  – 3030...3410 МПа, а для зразка із застосуванням вібрації  $HV_{0,5}$  – 4500 МПа;

з боку основного металу біля лінії сплавлення виникає дифузійна зона, що являє собою тонкопластинчатий перліт і ферит по межах зерен, іноді з відманштетовою орієнтацією з мікротвердістю

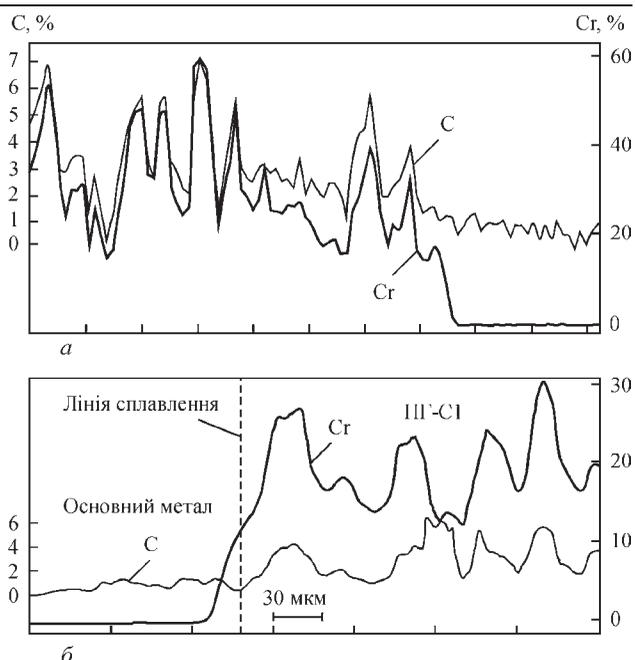


Рис. 3. Розподіл вуглецю і хрому по товщині наплавленого металу: *a* — без вібрації; *б* — із застосуванням вібрації

$HV_{0,5}$  – 2440 МПа, що виникла внаслідок дифузії вуглецю з сормаїтом в основний метал.

Мікроструктура наплавленого металу представлена на рис. 2.

Характеристики мікротвердості структурних складових приведені в табл. 3.

Необхідно відзначити відмінності у структурі двох варіантів наплавленого металу. Горизонтальна вібрація приводить до помітного подрібнення карбідної складової (рис. 2, б). Карбіди, що мають вид шестигранників з середньою довжиною сторони 10...12 мкм, без вібрації (див. рис. 2, а) подрібнюються до 3,5...5,0 мкм при застосуванні горизонтальної вібрації (рис. 2, б).

Максимальна глибина евтектичної зони в зразку без застосування горизонтальної вібрації (див. рис. 2, а), а мінімальна — у зразку із горизонтальною вібрацією (рис. 2, б) і вона займає найменший відсоток аустенітних дендритів по довжині наплавлення в порівнянні з першим випадком. При горизонтальній вібрації лінія з'єднання з боку сормаїту в основному являє собою білу смужку з утворенням майже рівноосних зерен аустеніту (див. рис. 2, б).

З метою визначення складу структурних складових (хрому, вуглецю) і встановлення впливу їх на властивості наплавленого металу, був проведе-

Таблиця 3. Характеристики мікротвердості структурних складових

Технологічна операція	Мікротвердість структурних складових, МПа		
	Карбіди хрому	Матриця	Біла смужка (перехідна зона)
Без вібрації	11710...12830	4550...5140	3030...3410
З вібрацією	14300...15440	5150...5900	4500

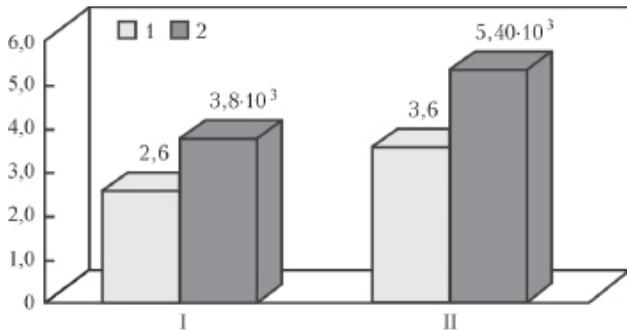


Рис. 4. Відносна зносостійкість і твердість наплавленого металу: I — без вібрації; II — із застосуванням вібрації; 1 — відносна зносостійкість; 2 — твердість наплавленого металу, МПа

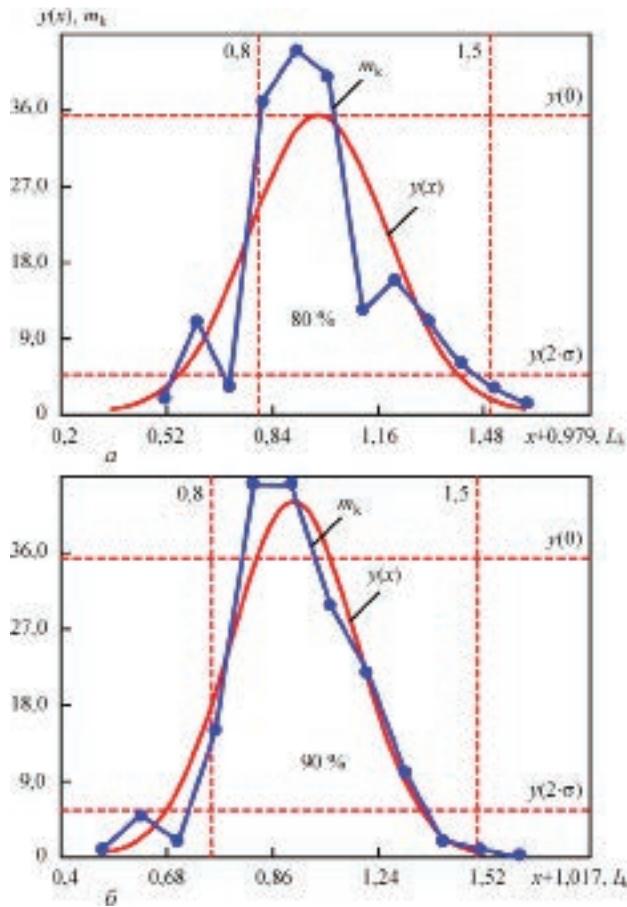


Рис. 5. Криві нормального розподілу товщини шару наплавленого металу ( $h$ , мм) при одночасному наплавленні з використанням енергоощадного режиму ( $n$  — кількість точок у заданому інтервалі при вимірюванні товщини):  $a$  — без вібрації;  $b$  — із застосуванням горизонтальної вібрації

ний мікрорентгеноспектральний аналіз наплавленого металу (рис. 3).

У всіх випадках аналіз проводили приблизно в центрі наплавленого шару металу перпендикулярно лінії сплавлення на глибині до 350 мкм від межі сплавлення.

Встановлено, що в металі досліджуваних зразків вуглець зв'язаний в карбіди типу  $(Fe, Cr)_7C_3$  і  $(Fe, Cr)_3C$ , помітного дифузійного перерозподілу вуглецю біля лінії сплавлення не спостерігалося.

На рис. 4 представлені діаграми відносної зносостійкості і твердості наплавлених зразків (середні за трьома випробуваннями).

Як видно із рис. 4, для випадку, коли виконується наплавлення без вібрації, зносостійкість становить 2,6 і твердість 3800 МПа, а у випадку застосування горизонтальної вібрації, зносостійкість — 3,6 і твердість 5400 МПа відповідно. Це досягається за рахунок більш сприятливого розподілу легуючих елементів в наплавленому шарі металу.

На рис. 5 показані криві нормального розподілу товщини шару наплавленого металу. Рівномірність товщини шару наплавленого металу в порівнянні з наплавленням без використання горизонтальної вібрації підвищується на 10 % (див. рис. 5), що забезпечує рівномірний розподіл рідкого металу в зоні наплавлення.

### Висновки

Дослідження індукційного наплавлення деталей показали, що при застосуванні горизонтальної вібрації, комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів та енергоощадного режиму наплавлення, зносостійкість підвищується в 1,4 рази, стабільність товщини шару наплавленого металу відповідно на 10 % та покращується якість наплавленого металу в порівнянні з технологією без прикладання горизонтальної вібрації.

### Список літератури

1. Рябцев И.А. (2004) *Наплавка деталей машин и механизмов*. Киев, Экотехнология.
2. Ткачев В.Н. (1971) *Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин*. Москва, Машиностроение.
3. Пулька Ч.В. (2006) *Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків*: дис. ... доктора техн. наук, Київ.
4. Лозинский М.Г. (1958) *Промышленное применение индукционного нагрева*. Москва, Изд-во АН СССР.
5. Бабат Г.И. (1965) *Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение*. Москва, Энергия.
6. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. (1974) *Индукторы для индукционного нагрева*. Ленинград, Энергия.
7. Brezinová J., Guzanová A., Draganovská D. et al. (2016) Study of selected properties of thermally sprayed coatings containing WC and WB hard particles. *Acta Mech. Autom.*, **10**, 296-299, doi:10.1515/ama-2016-0046.
8. Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С. (2013) Совершенствование оборудования и технологии индукционной наплавки. *Сварочное производство*, **4**, 27-30.
9. Шаблій О.Н., Пулька Ч.В., Будзан Б.П. (1988) Пути экономии электроэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков. *Автоматическая сварка*, **12**, 56-58.
10. Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С., Шарик М.В. (2012) *Спосіб наплавлення сталевих дисків*. Пат. на корисну модель 72129 UA, МПК В23К 13/00. Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя.
11. Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С., Шарик М.В. (2012) *Спосіб наплавлення тонких дисків*. Пат. на корисну модель 73032 UA, МПК В23К 13/00. Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя.

12. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Марьенко В.А. (1979) Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла. *Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 23–27.
13. Пулька Ч.В. (1998) Программирование режима нагрева при индукционной наплавке тонких стальных дисков. *Автоматическая сварка*, **1**, 48–50.
14. Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Письменний О.С. (2004) *Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення*. Деклараційний пат. UA 68940A, 7B23K 13/00.
7. Brezinova, J., Guzanova, A., Draganovska, D. et al. (2016) Study of selected properties of thermally sprayed coatings containing WC and WB hard particles. *Acta Mech. Autom.*, **10**, 296-299. Doi:10.1515/ama-2016-0046.
8. Pulka, Ch.V., Gavrilyuk, V.Ya., Senchishin, V.S. (2013) Improvement of equipment and technology of induction surfacing. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 27-30 [in Russian].
9. Shably, O.N., Pulka, Ch.V., Budzan, B.P. (1988) Ways of energy saving in induction surfacing of thin-wall discs. *Avtomatich. Svarka*, **12**, 56-58 [in Russian].
10. Pulka, Ch.V., Shablii, O.M., Gavrylyuk, V.Ya., Senchyshyn, V.S., Sharyk, M.V. (2012) *Method of surfacing of steel discs*. Pat. on utility 72129 UA, Int. Cl. B23K 13/00. Ternop. NTU [in Ukrainian].
11. Pulka, Ch.V., Shablii, O.M., Gavrylyuk, V.Ya., Senchyshyn, V.S., Sharyk, M.V. (2012) *Method of surfacing of steel discs*. Pat. on utility 73032 UA, Int. Cl. B23K 13/00. Ternop. NTU [in Ukrainian].
12. Yuzvenko, Yu.A., Gavrish, V.A., Marienko, V.A. (1979) Laboratory units for evaluation of wear resistance of deposited metal. Theoretical and technological principles of surfacing. *Properties and tests of deposited metal*. Kiev, PWI, 23–27 [in Russian].
13. Pulka, Ch.V. (1998) Programming of heating mode in induction surfacing of thin steel discs. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 48-50 [in Russian].
14. Shablii, O.M., Pulka, Ch.V., Pysmennyi, O.S. (2004) *Device for control of power in surfacing zone*. Declar. Pat. UA 68940A, Int. Cl. 7B23K 13/00 [in Ukrainian].

**References**

**ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА**

Ч.В. Пулька, М.И. Подгурский, В.С. Сенчишин, М.В. Шарик, В.Я. Гаврилюк

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя МОН Украины.  
46001, г. Тернополь, ул. Русская, 56. E-mail: Viktor\_Synchyshyn@i.ua

Проведено исследование износостойкости и стабильности толщины слоя металла, наплавленного индукционным методом. Показано, что при наплавке порошкообразным твердым сплавом ПГ-С1 нагревательной системой ИТЕЕ (индуктор, тепловой и электромагнитный экраны) с приложением горизонтальной вибрации и энергосберегающего режима наплавки, износостойкость повышается в 1,4 раза, стабильность толщины слоя наплавленного металла на 10 % и улучшается качество наплавленного металла (с крупнозернистой структуры в мелкозернистую) по сравнению с технологией без горизонтальной вибрации. Библиогр. 14, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* индукционная наплавка, тонкие стальные диски, горизонтальная механическая вибрация, микроструктура, износостойкость, тепловой и электромагнитный экраны, энергосберегающий режим

**EFFECT OF HORIZONTAL MECHANICAL VIBRATION ON DEPOSITED METAL SERVICE PROPERTIES**

Ch.V. Pulka, M.I. Pidgurskiy, V.S. Senchishin, M.V. Sharik, V.Ya. Gavrilyuk

Ternopil Ivan Puluj National Technical University of MOS of Ukraine.  
56 Ruska Str., 46001, Ternopil. E-mail: Viktor\_Synchyshyn@i.ua

Wear resistance and stability of thickness of the layer of metal deposited by the induction method was studied. It is shown that at surfacing with powderlike hard alloy PG-S1 by ITES heating system (inductor, thermal and electromagnetic shields) with application of horizontal vibration and energy-saving surfacing mode, the wear resistance increases 1.4 times, stability of deposited metal layer thickness – by 10% and deposited metal quality is improved (transformation from coarse- to fine-grained structure), compared to the technology of horizontal vibration. 11 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

*Keywords:* induction surfacing, thin steel discs, horizontal mechanical vibration, microstructure, wear resistance, thermal and electromagnetic shield, energy-saving mode

Надійшла до редакції 19.04.2019

## ДИФФУЗИОННЫЕ ЖАРСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ И УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЕЙ

А.Л. Борисова<sup>1</sup>, Н.И. Капорик<sup>1</sup>, Т.В. Цымбалистая<sup>1</sup>, М.А. Васильковская<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт проблем материаловедения им. Францевича.

03680, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: kparis-gpk@ukr.net

Представлены результаты исследования жаростойкости диффузионных покрытий на стали 08X17T и стали 45, полученных методами алитирования и хромоалитирования в порошковых смесях при температуре 900...950 °С в течение 2...5 ч. По кинетическим зависимостям окисления образцов с покрытиями в температурном интервале 800...1000 °С построены параметрические диаграммы жаростойкости, позволяющие проводить оценку долговечности защитных покрытий при температурах до 1000 °С. Библиогр. 8, табл. 3, рис. 7.

*Ключевые слова:* алитирование, хромоалитирование, жаростойкие покрытия, микроструктура, фазовый состав, кинетика окисления, параметр жаростойкости

Все типы защитных покрытий, в том числе и жаростойкие, по характеру их формирования можно разделить на две основные группы: диффузионные и наслоенные покрытия [1].

I — покрытия диффузионного типа, состав которых является продуктом взаимодействия насыщающей среды с металлом основы. Их получают насыщением поверхности защищаемого металла одним или несколькими элементами для образования защитного слоя.

II — покрытия наслоенного типа, наносимые на поверхность защищаемого металла из жаростойкого материала, например, методами газотермического напыления.

Наиболее широко применяются покрытия диффузионного типа. Их преимуществом является хорошее сцепление с основой и сравнительно простая технология нанесения, недостатком — высокая температура формирования, довольно активное диффузионное взаимодействие с основой.

Покрытия наслоенного типа наносятся, как правило, на холодную или подогретую до невысокой температуры основу, однако имеют более слабое, по сравнению с диффузионными покрытиями, сцепление с основой и требуют использования и более сложного оборудования.

Совмещение способов формирования защитных покрытий, по-видимому, позволит значительно уменьшить недостатки обеих групп.

При выполнении проекта программы «Ресурс — 2» Р5.1.2 «Повышение долговечности и эффективности работы рекуперативных теплообменников путем нанесения жаростойких излучающих покрытий для защиты поверхностей нагрева, которые работают в потоке продуктов сгорания топлива, и совершенствования конструкций внутренних

вторичных излучателей» были разработаны жаростойкие покрытия двух типов. Результаты исследования покрытий, получаемых методами газотермического напыления из композиционного порошка FeAlCr с добавкой 2 мас. % CeO<sub>2</sub>, опубликованы в работе [2]. Настоящая работа посвящена решению той же проблемы с помощью покрытий диффузионного типа.

К наиболее перспективным диффузионным методам получения жаростойких покрытий на сталях относятся процессы алитирования и хромоалитирования [3–6]. При этом помимо жаростойкости диффузионное насыщение поверхности металлов и сплавов алюминием и одновременное или последовательное насыщение алюминием и хромом приводит к повышению коррозионной и эрозионной стойкости. Среди многочисленных методов алитирования и хромоалитирования наиболее широкое распространение и промышленное применение получил метод насыщения в порошковых смесях.

Известно, что структура, фазовый состав, защитные свойства и долговечность покрытий зависят от таких факторов, как состав порошковой смеси, температура и время диффузионного насыщения, содержание легирующих элементов и многое другое, в связи с чем решение задачи повышения долговечности и эффективности работы конкретных деталей требует проведения дополнительных исследований.

В настоящей работе проводилось исследование процессов алитирования и хромоалитирования стали 08X17T (применяется для внешних вторичных излучателей рекуператоров) и стали 45 (для выяснения возможной замены легированной стали на углеродистую).

**Методы и материалы.** Процессы алитирования и хромоалитирования проводили в специальных контейнерах с плавким затвором при температуре 900...950 °С в течение 2...5 ч. Основными компонентами порошковых смесей были:

порошок алюминиевой пудры (источник алюминия при алитировании), смесь порошков хрома и алюминия (при хромоалитировании);

порошок фтористого алюминия  $AlF_3$  (активатор процесса);

порошок оксида алюминия (инертная добавка, предотвращающая спекание частиц порошков алюминия и смеси алюминия с хромом);

порошок гидроксида титана (для извлечения остатков кислорода из порошковой смеси).

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) выполняли на дифрактометре ДРОН-3 в  $CuK_{\alpha}$ -излучении с графитовым монохроматором. Фазы расшифровывали с помощью элементной базы данных ASTM.

Вырезку образцов с покрытиями выполняли на станке Isomet 1000. Вырезанные образцы заливали протокрилом марки М, шлифование проводили с использованием наждачной бумаги зернистостью от 600 до 1200, а полирование — алмазными

кругами от 80...40 до 20...14 на станке Row Rafterow Metasines. Финишную полировку выполняли на войлочном круге с использованием суспензии оксида хрома. Для выявления микроструктуры травление образцов проводили в спиртовом растворе  $NH_4OH$  для стали 45 и HF для стали 08X17T. Металлографические исследования выполняли на микроскопе Neophot 32, оснащенный цифровым фотоаппаратом. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 г. Количество измерений составляло не менее 50.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1. представлена микроструктура, на рис. 2 — рентгенограмма диффузионных покрытий на стали 08X17T и стали 45, а в табл. 1 их характеристика.

Как следует из представленных данных, при диффузионном насыщении сталей алюминием на поверхности формируются слои интерметаллида железа, отличающиеся по толщине и твердости. Хром, как известно, тормозит диффузию алюминия в железо, что приводит к меньшей толщине алитированного слоя на стали 08X17T по сравнению его со сталью 45, в то время как его твердость из-за наличия хрома повышается. Следует отметить, за областью интерметаллида FeAl

**Таблица 1.** Характеристика жаростойких покрытий

Покрытие	Характеристика покрытия					
	Толщина, мкм		Микротвердость, МПа		Фазовый состав	
	08X17T	Сталь 45	08X17T	Сталь 45	08X17T	Сталь 45
Алитирование	160±15	230±20	3240±450	2560±490	FeAl	FeAl, Fe <sub>3</sub> Al
Хромоалитирование	200±10	205±10	3340±630	2800±690	FeAl, Fe <sub>31,2</sub> Cr <sub>10,3</sub> Al <sub>58,5</sub>	FeAl, Fe <sub>3</sub> Al

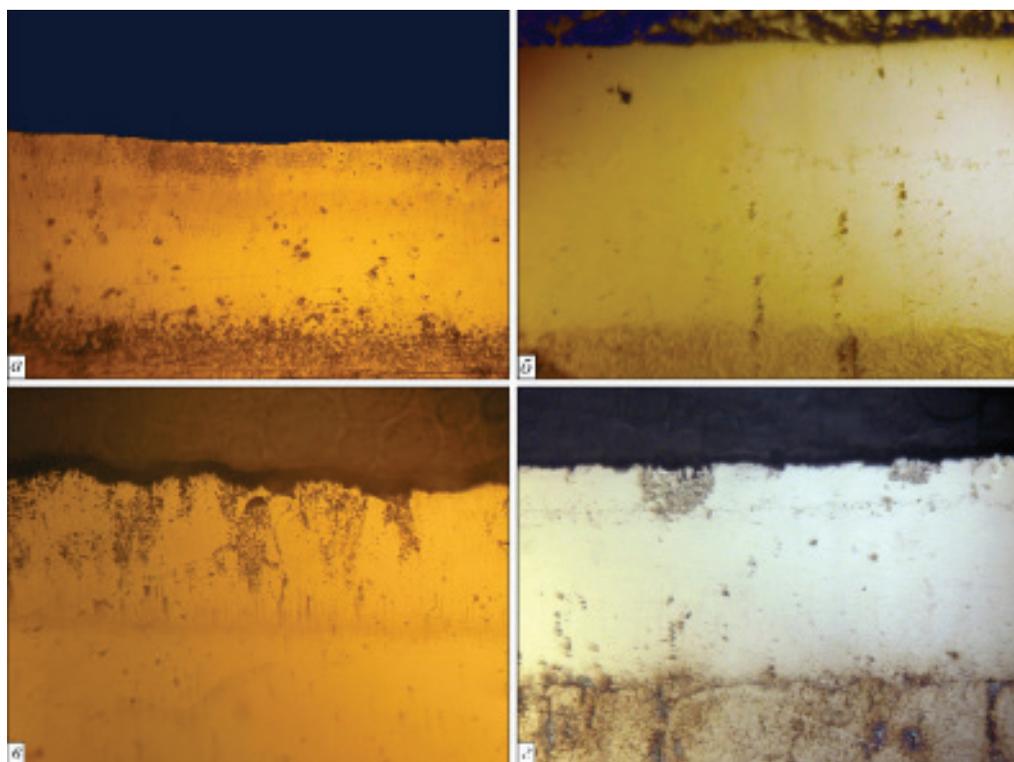


Рис. 1. Микроструктура (×400) алитированных (а, б) и хромоалитированных (в, з) стали 08X17T (а, в) и стали 45 (б, з)

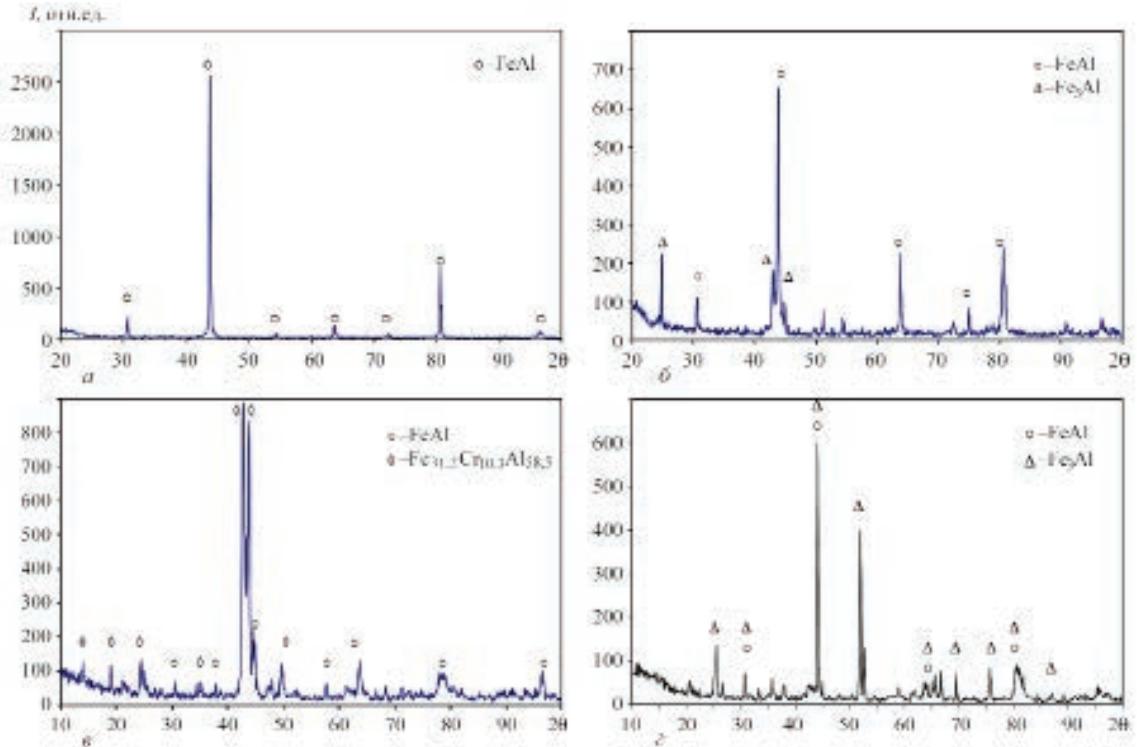


Рис. 2. Рентгенограммы диффузионных покрытий на стали 08X17T (а, в) и стали 45 (б, г), полученных методами алитирования (а, б) и хромоалитирования (в, г)

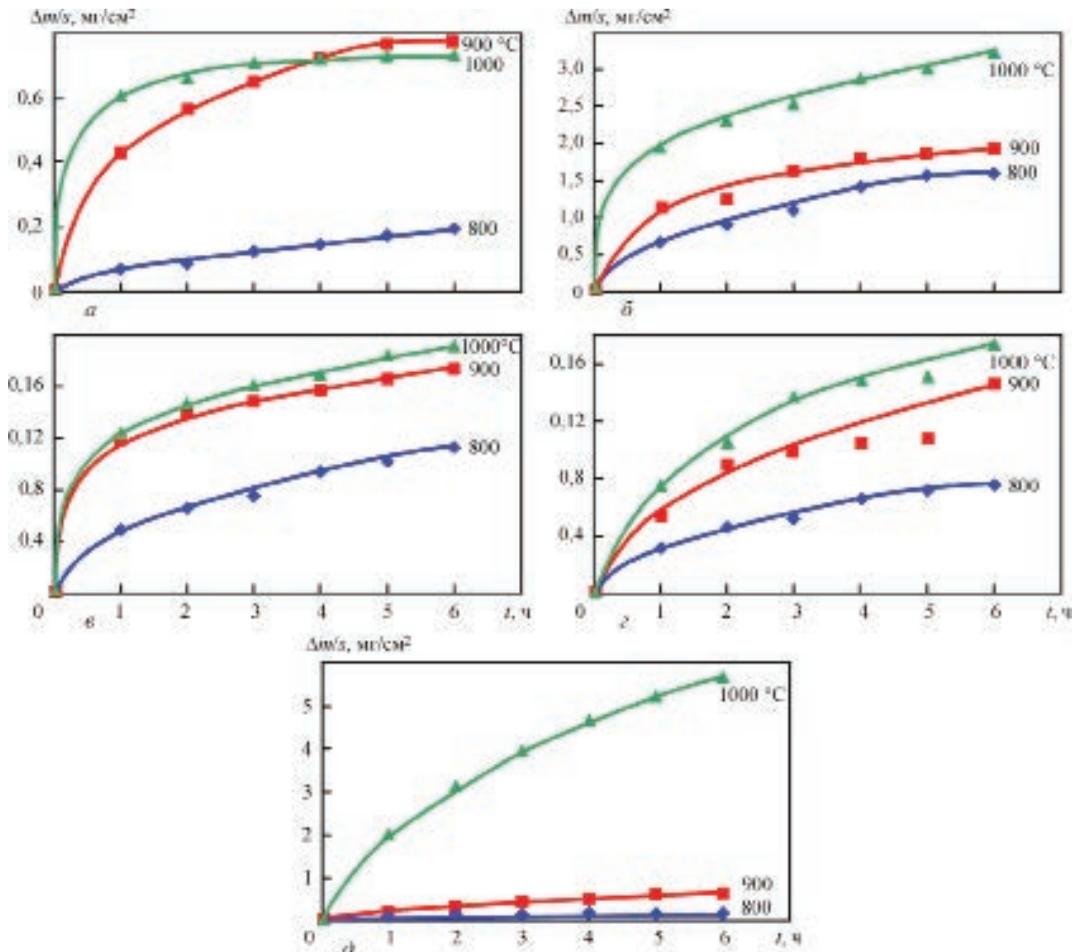


Рис. 3. Кинетические зависимости окисления алитированных (а, б) и хромоалитированных (в, г) стали 08X17T (а, в) и стали 45 (б, г), а также незащищенной стали 08X17T (д)

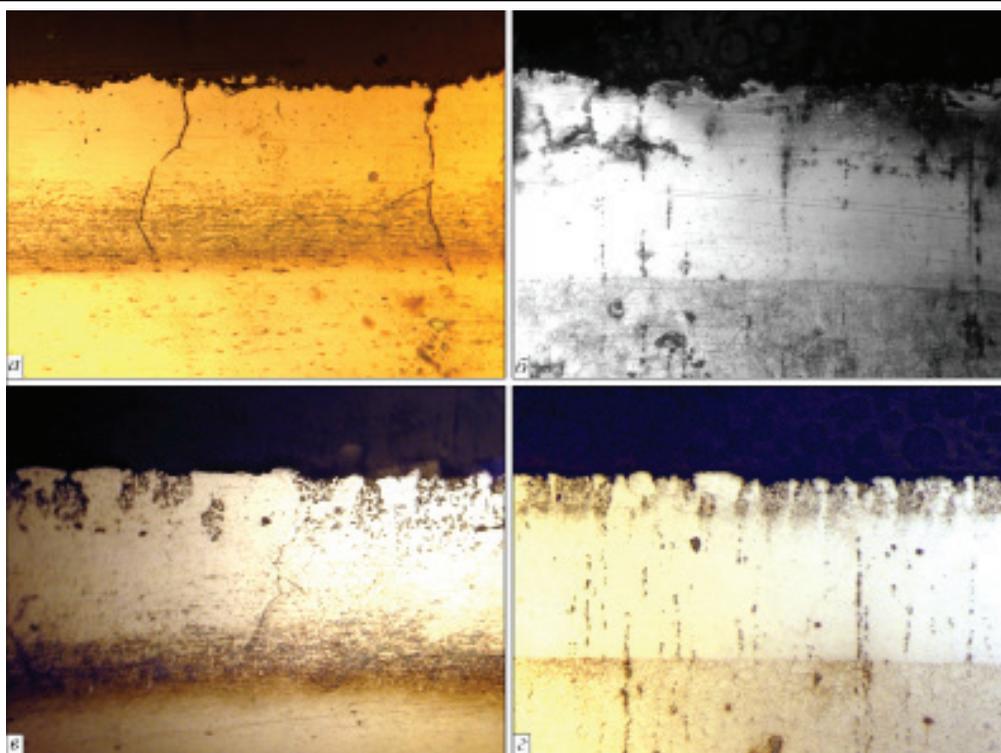


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 200$ ) алитированных (а, б) и хромоалитированных (в, г) стали 08X17Т (а, в) и стали 45 (б, г) после испытания на жаростойкость при температуре 1000 °С в течение 5 ч

располагается область твердого раствора алюминия в железе, простирающаяся на глубину до 400 мкм (для стали 08X17Т), и до 600 мкм (для

стали 45), при этом микротвердость его плавно уменьшается по направлению к сердцевине (от 2000 до 1500 МПа).

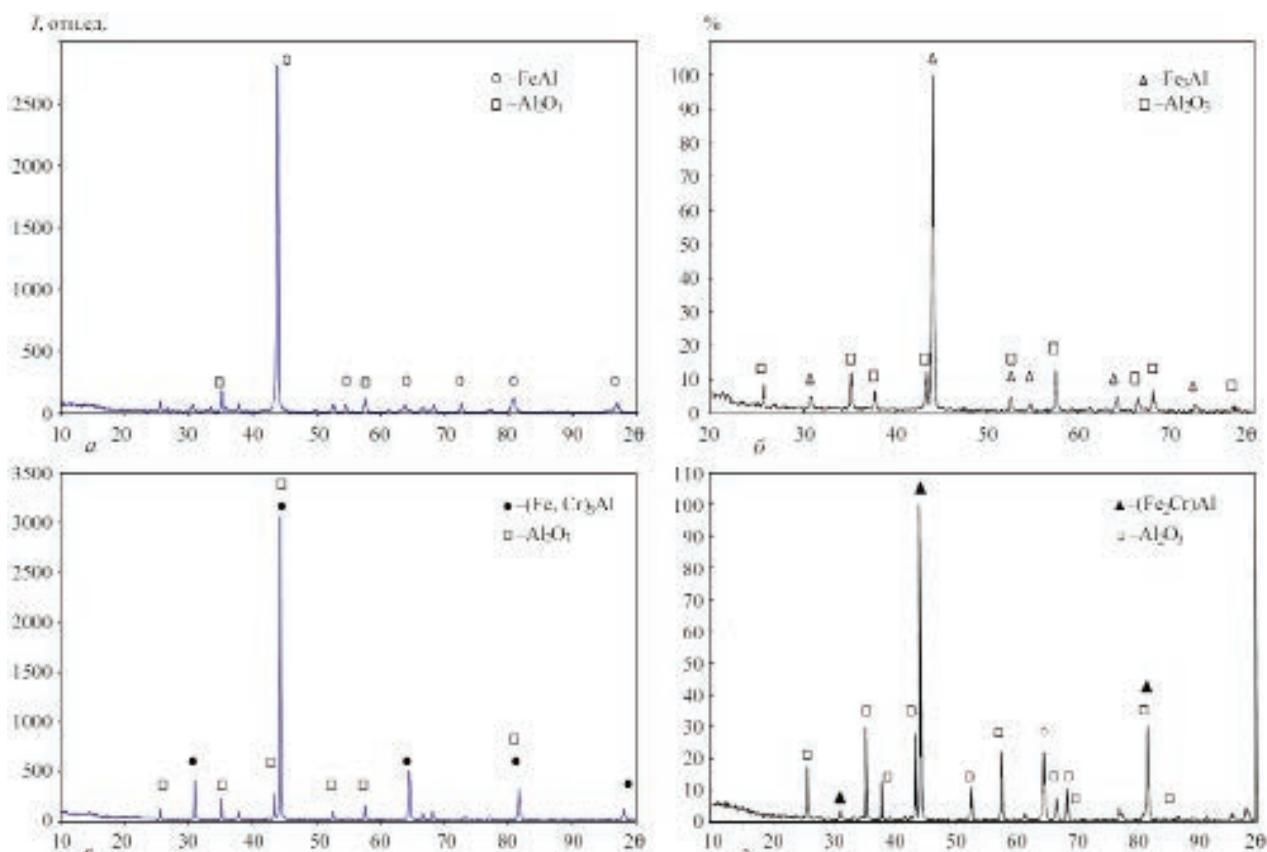


Рис. 5. Рентгенограммы алитированных (а, б) и хромоалитированных (в, г) стали 08X17Т (а, в) и стали 45 (б, г) после испытания на жаростойкость при температуре 1000 °С в течение 5 ч

Таблица 2. Характеристика покрытий после испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С в течение 5 ч

Покрытие	Характеристика покрытия					
	Толщина, мкм		Микротвердость, МПа		Фазовый состав	
	08X17T	Сталь 45	08X17T	Сталь 45	08X17T	Сталь 45
Алитирование	320±15	320±20	2780±560	2370±400	FeAl, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Хромоалитирование	290±5	300±10	3260±520	2230±320	(Fe,Cr) <sub>3</sub> Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Fe <sub>2</sub> Cr)Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

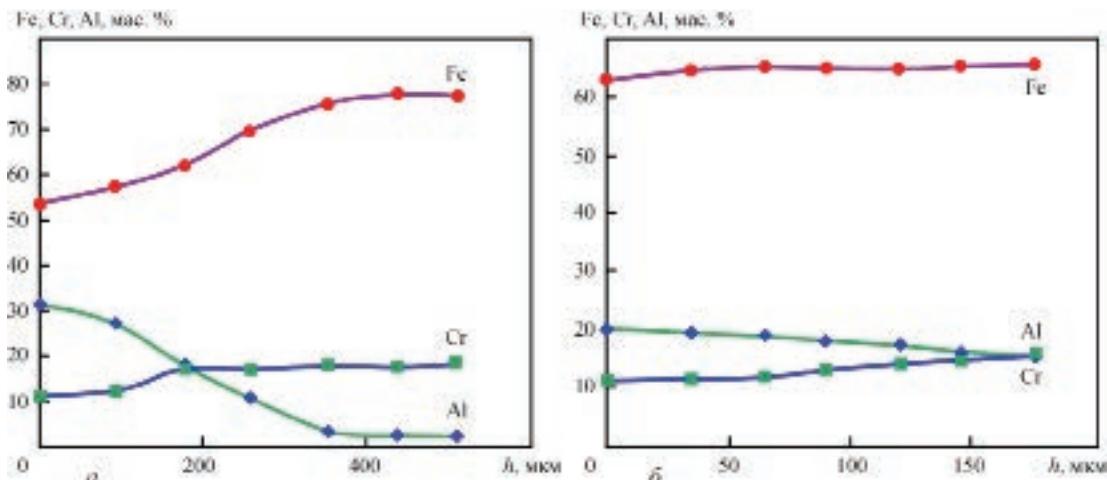


Рис. 6. Распределение элементов по глубине диффузионных слоев хромоалитированной стали 08X17T в исходном состоянии (а) и после окисления на воздухе при температуре 1000 °С в течение 5 ч (б)

При хромоалитировании стали 08X17T в поверхностном слое покрытия обнаружено два интерметаллида: FeAl, легированный хромом, и Fe<sub>31,2</sub>Cr<sub>10,3</sub>Al<sub>58,5</sub> (фаза, близкая по составу к Fe<sub>3</sub>CrAl<sub>6</sub>), а на стали 45 — FeAl и Fe<sub>3</sub>Al, легированные хромом. Микротвердость этих покрытий несколько выше, чем алитированных слоев на тех же сталях.

Типичные кинетические зависимости окисления диффузионных покрытий и незащищенной стали 08X17T представлены на рис. 3, а на рис. 4 и 5 — микроструктура и рентгенограммы покрытий после испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С.

Как следует из представленных данных (рис. 3), механизм окисления диффузионных покрытий подчиняется параболическому временному закону во всем исследованном температурном интервале 800...1000 °С. Судя по результатам РСФА (рис. 5, табл. 2), основные изменения фазового состава в процессе окисления диффузионных покрытий — это образование оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в поверхностных слоях, за которым располагается область интерметаллидов FeAl или Fe<sub>3</sub>Al (в случае алитирования) или интерметаллидов FeAl и Fe<sub>3</sub>Al, легированных хромом (в случае хромоалитирования), постепенно переходящие в твердые растворы. Судя по результатам рентгено-спектрального микроанализа, содержание алюминия в покрытии снижается как в результате образования оксидной пленки, так и рассасывания его в основе. Так, например, на поверхности хромо-

алитированной стали 08X17T в исходном состоянии (рис. 6, а) содержание алюминия составляет около 31 мас. %, что соответствует составу интерметаллида FeAl, постепенно снижаясь на глубине около 150 мкм до 15 % (примерное содержание Al в Fe<sub>3</sub>Al), а далее до 2 % на глубине 600 мкм. После окисления при температуре 1000 °С в течение 6 ч эти величины составляют соответственно около 20 % и в поверхностном слое примерно 15 мас. % на глубине около 200 мкм (рис. 6, б).

Сравнивая микроструктуру диффузионных покрытий в исходном состоянии (рис. 1) и после окисления при максимальной температуре 1000 °С (рис. 4), можно отметить наличие продольных (по глубине) трещин на стали 08X17T и практическое их отсутствие на стали 45.

Дефекты в диффузионных покрытиях подобного рода возникают в связи с возникновением остаточных напряжений, величина и знак которых зависят от химического и фазового состава диффузионного слоя, который в данном случае существенно отличается (см. рис. 2, табл. 1). Что касается влияния такого рода трещин на жаростойкость защитных покрытий, то оно далеко неоднозначно. Дело в том, что для долговечности покрытий, работающих при высоких температурах, не менее важной характеристикой является термостойкость, от которой зависит сохранение или отслаивание защитного слоя в процессе испытаний. Одним из путей повышения термостойкости заключается в снижении эффективного модуля упругости защитного слоя путем создания

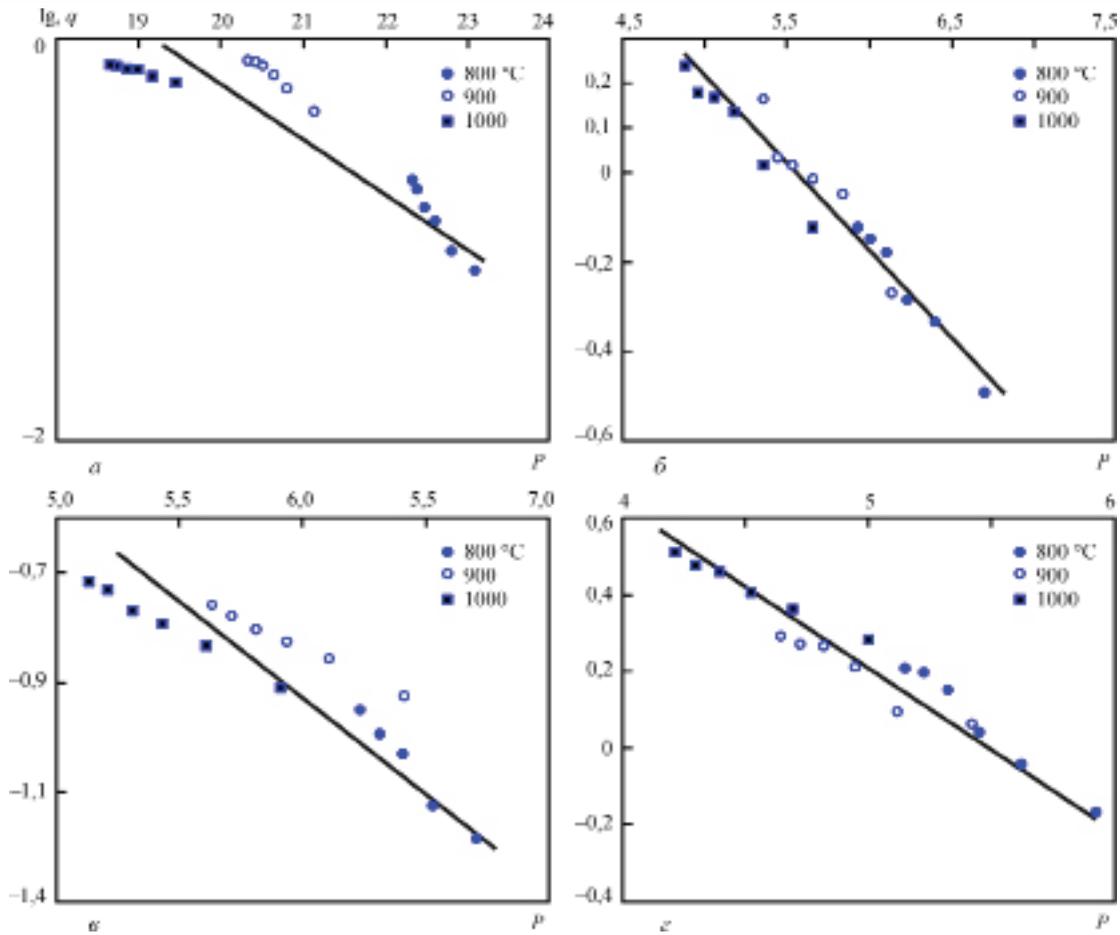


Рис. 7. Параметрические диаграммы жаростойкости для алитированных (а, б) и хромоалитированных (в, з) стали 08Х17Т (а, в) и стали 45 (б, з) по результатам испытаний на жаростойкость при температурах 800...1000 °С в течение 1...5 ч

деформационной структуры [7]. Это может быть достигнуто благодаря сохранению значительной остаточной пористости или создания искусственным путем микротрещин, ориентированных перпенди-

кулярно поверхности раздела покрытия с основой [8]. Как показали исследования, в нстоящей работе наличие трещин в покрытиях не отразилось на характер их окисления, о чем свидетельствуют кине-

Таблица 3. Результаты расчета параметров жаростойкости хромоалитированной стали 45

Температура, К	$10^3/T$	Время окисления, ч	$\lg t$	Удельный прирост массы, мг/см <sup>2</sup>	$\lg q$	$\frac{Q \lg e}{RT}$	Параметр жаростойкости P
1073	0,932	1	0	0,32	-0,49	6,71	6,709746
		2	0,301	0,467	-0,33		6,408746
		3	0,477	0,52	-0,28		6,232746
		4	0,602	0,66	-0,176		6,107746
		5	0,699	0,72	-0,143		6,010746
		6	0,778	0,75	-0,12		5,931746
1173	0,852	1	0	0,54	-0,267	6,138	6,137731
		2	0,301	0,9	-0,046		5,836731
		3	0,477	0,97	-0,012		5,660731
		4	0,602	1,04	0,018		5,535731
		5	0,699	1,08	0,03		5,438731
		6	0,778	1,457	0,16		5,359731
1273	0,785	1	0	0,75	-0,122	5,65	5,655584
		2	0,301	1,04	0,0185		5,354584
		3	0,477	1,36	0,136		5,178584
		4	0,602	1,47	0,168		5,053584
		5	0,699	1,51	0,179		4,956584
		6	0,778	1,727	0,237		4,877584

$Q = 33025,5$

тические зависимости окисления диффузионных покрытий, представленные на рис. 3.

Проведенные исследования позволили путем построения параметрических диаграмм жаростойкости (рис. 7) проводить оценку долговечности защитных деталей для любых температур до 1000 °С.

Методика построения параметрических диаграмм жаростойкости детально изложена в работе [4], а в табл. 3 в качестве примера представлены результаты расчета параметра жаростойкости хромоалитированной стали 45 по результатам настоящей работы.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что алитирование повышает жаростойкость стали 45 в 2 раза, стали 08X17T — более чем в 7 раз, а хромоалитирование стали 45 — в 3,5 раза. Наиболее высокую жаростойкость в диапазоне 800...1000 °С имеет хромоалитированная сталь 08X17T, которая превышает стойкость незащищенной стали при 1000 °С более, чем в 25 раз. Сравнение результатов настоящей работы с предыдущими исследованиями [1] показало, что диффузионные покрытия (алитирование и хромоалитирование) способны в целом защищать от окисления сталь 08X17T и сталь 45 до более высоких температур (вплоть до 1000 °С) по сравнению с АДМ- и ЭДМ-покрытиями из композиционного порошка FeAlCr — CeO<sub>2</sub> (до 800 °С). Однако следует иметь в виду, что методы газотермического напыления характеризуются такими преимуществами по сравнению с диффузионными, как возможность защиты крупногабаритных деталей и получения больших толщин защитного слоя.

В настоящее время изготовлены образцы-прототипы внутренних вторичных излучателей рекуператоров из стали 08X17T и стали 45 с диффузионными и газотермическими покрытиями для длительных испытаний на основном стенде Института газа НАНУ в течение 2019–2020 гг.

## ДИФУЗІЙНІ ЖАРОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ ТА ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛЕЙ

А.Л. Борисова<sup>1</sup>, Н.І Капорік<sup>1</sup>, Т.В. Цимбаліста<sup>1</sup>, М.А. Васильківська<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: borisov@pwi.ru.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. Францевича.

03680, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: kiparis-gpk@ukr.net

Представлено результати дослідження жаростійкості дифузійних покриттів на сталі 08X17T та сталі 45, отриманих методами алітування та хромоалітування в порошкових сумішах при температурі 900...950 °С протягом 2...5 год. За кінетичними залежностями окислення зразків з покриттями в температурному інтервалі 800...1000 °С побудовані параметричні діаграми жаростійкості, що дозволяють здійснювати оцінку довговічності захисних покриттів при температурах до 1000 °С. Бібліогр. 8, табл. 3, рис. 7.

*Ключові слова:* алітування, хромоалітування, жаростійкі покриття, мікроструктура, фазовий склад, кінетика окислення, параметр жаростійкості

### Список литературы

1. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Цымбалиста Т.В. и др. (2019) Жаростойкие газотермические покрытия на основе интерметаллида FeAlCr с добавкой CeO<sub>2</sub>. *Автоматическая сварка*, **9**, 31–39.
2. Аппен А.А. (1976) *Температуроустойчивые неорганические покрытия*. Изд. 2-е, пер. и доп. Ленинград, Химия.
3. Борисенюк Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. (1981) *Химико-термическая обработка металлов и сплавов*. Справочник. Москва, Металлургия.
4. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Мосоров В.И., Бутухаров В.А. (2015) Перспективные диффузионные покрытия. *Международный журнал экспериментального образования*, **12**(4), 1, 572–573.
5. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. (2012) Диффузионные алюминиевые покрытия для защиты поверхности внутренней полосы лопаток турбин. *Металлы*, **5**, 4–13.
6. Бурнышев И.Н., Порываев Д.А. (2015) Алитирование сталей в динамической насыщающей среде. *Химическая физика и мезоскопия*, **17**, **3**, 364–371.
7. Grot A.S., Mortin I.K. (1981) Behavior of plasma-sprayed ceramic thermal-barrier coating for gas turbine applications. *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, **60**, 807–811.
8. Борисова А.Л., Адеева Л.И., Туник А.Ю. (1994) Влияние характеристик исходного материала и условий напыления на структуру и свойства газотермических покрытий. *Препр. НАН Украины Институт электросварки им. Е.О. Патона*.

### References

1. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Tsybmalista, T.V. et al. (2019) Heat-resistant thermal coatings based on intermetallics with CeO<sub>2</sub> additives. *The Paton Welding J.*, **9**. In print.
2. Appen, A.A. (1976) *Temperature-resistant inorganic coatings*. 2nd ed. Leningrad, Khimiya [in Russian].
3. Borisenyuk, G.V., Vasiliev, L.A., Voroshnin, L.G. et al. (1981) *Chemical and heat treatment of metals and alloys*. In: Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Lygdenov, B.D., Guriev, A.M., Mosorov, V.I., Butukharov, V.A. (2015) Perspective diffusion coatings. *Int. J. of Experimental Education*, **12**(4), [in Russian]??
5. Muboyadzhyan, S.A., Galoyan, A.G. (2012) Diffusion aluminium coatings for protection of surface of inner sealing band of turbine blades. *Metally*, **5**, 4-13 [in Russian].
6. Burnyshev, I.N., Poryvaev, D.A. (2015) Aluminizing of steels in dynamic saturation medium. *Khimicheskaya Fizika i Mezoskopiya*, **17**(3), 364-371 [in Russian].
7. Grot, A.S., Mortin, I.K. (1981) Behavior of plasma-sprayed ceramic thermal-barrier coating for gas turbine applications. *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, **60**, 807-811.
8. Borisova, A.L., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. (1994) *Influence of characteristics of initial material and conditions of spraying on structure and properties of thermal coatings*. Kyiv, PWI [in Russian].

## DIFFUSION HEAT-RESISTANT COATINGS FOR STAINLESS AND CARBON STEELS

A. L. Borisova<sup>1</sup>, N. I. Kaporik<sup>1</sup>, T. V. Tsymbalista<sup>1</sup>, M. A. Vasilkovskaya<sup>2</sup>

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

E-mail:borisov@pwi.ru.kiev.ua

<sup>2</sup>I. M. Frantsevich Institute of Problems of Materials Science

<sup>3</sup>Krzhyzhanovskogo Str., 03680, Kyiv. E-mail: kiparis-gpk@ukr.net

The paper presents the results of investigation of heat-resistant diffusion coatings on steel 08Kh17T and steel 45, produced by aluminizing and chrome aluminizing methods in powder mixtures at 900...950 °C temperature for 2...5 h. The parametric diagrams of heat resistance were plotted on the kinetic dependencies of oxidation of the samples with coatings in 800...1000 °C temperature interval. They allow evaluating endurance of protective coatings at any temperatures up to 1000 °C. 8 Ref., 3 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: aluminizing, chrome aluminizing, heat-resistant coatings, microstructure, phase composition, oxidation kinetics, heat resistance parameter*

Поступила в редакцию 24.07.2019

Благодаря полностью собственному производственному процессу компании Welding Alloys, линейка продукции X-elium способна удовлетворить растущие потребности за счет снижения затрат на производство и техническое обслуживание

Данная линейка разработана научно-исследовательским отделом компании Welding Alloys, выполнена из инновационных сплавов и обеспечивает:

- ▶ большие преимущества по сравнению со стандартными сплавами при эквивалентной цене
- ▶ преимущества, которыми обладают стандартные сплавы, по более низкой цене

**Первые три продукта, включенные в линейку X-elium**

Проволока с газообразующим покрытием марки **HARDFACE LP-G**  
Самый легкий путь наверх!  
Идеальное решение для сварки в неудобных положениях

Проволока для сварки открытой дугой марки **HARDFACE HCNB-O**  
Совершенствуйте ваши стандартные решения!  
Наплавка чугуна, превосходящая стандартные решения

Проволока для сварки открытой дугой с газообразующим покрытием марки **HARDFACE NCWB-O/G**  
Никогда не бойтесь сильных!  
Надежное решение для износостойкой наплавки с минимизацией минеральной зрости, обеспечивающее чрезвычайно высокую прочность с первого слоя

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ СВАРОЧНЫЙ ПРОЦЕСС. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ (Обзор)

**Б.Е. Патон, К.А. Ющенко, С.М. Козулин, И.И. Лычко**

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

Изложены результаты аналитического обзора исследований и промышленного применения электрошлаковой сварки и наплавки в Украине, а также зарубежных странах с начала XXI века. Анализ показал, что объем применения электрошлаковой сварки металла большой толщины (более 100 мм) в разных отраслях промышленности заметно уменьшился, однако в последние годы отмечается устойчивый рост ее применения в строительстве мостов, высотных зданий, судостроении, а также при ремонте крупных деталей машин на месте их эксплуатации. Новые стали, малочувствительные к росту зерна в зоне термического влияния, позволили расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых с применением электрошлаковой сварки. Существенно увеличился объем применения электрошлаковой наплавки ленточным электродом для антикоррозионных покрытий в сосудах высокого давления, сепараторах, парогенераторах, компрессорах и другом оборудовании, которое эксплуатируется в нефтегазовой, энергетической, металлургической, целлюлозно-бумажной и химической промышленности. Библиогр. 51, рис. 5.

*Ключевые слова:* электрошлаковая сварка, электрошлаковая наплавка, сварочное оборудование, технология, проволочный электрод, плавящийся мундштук, ленточный электрод, удельная погонная энергия, сталь, тепловложение, зона термического влияния, ударная вязкость

**Электрошлаковый сварочный процесс в Украине.** Семьдесят лет назад [1] в Институте электросварки (г. Киев) для сварки вертикальных стыковых соединений кожухов доменных печей, впервые в мировой практике был разработан и успешно реализован новый способ электрической сварки плавлением, получивший название электрошлаковая сварка (ЭШС). Этот способ отличался целым рядом технических и технологических преимуществ относительно существующих промышленных способов сварки плавлением [2].

Феномен появления, развития и последующего применения способов ЭШС и электрошлаковой наплавки (ЭШН) в промышленно-развитых странах можно объяснить высоким потенциалом процесса [3, 4] для развития экономики. Успешному его применению способствовало сотрудничество Института с ведущими промышленными предприятиями СССР, СЭВ, а также многими зарубежными фирмами [2, 5].

На пороге XXI века высокий научно-технический уровень существующих способов, сварочного оборудования, оснастки и технологий ЭШС и ЭШН в сварочном производстве различных отраслей машиностроения и строительстве позволяли успешно решать важные задачи. Например, разработка техники и технологии ЭШС плавящимся мундштуком конструкций из нержавеющей стали типа 18-8; исследование и разработка технологии и техники ЭШС сталей применительно к элементам сверхпроводящих магнитных систем

термоядерного реактора «ITER»; разработка технологии и техники ЭШС неповоротных стыков титановых кольцевых заготовок диаметром 1000 мм с толщиной стенки 100 мм; сварка электродом большого сечения меди с хромоциркониевой бронзой применительно к изготовлению мощных токоподводов системы питания термоядерной установки «Токамак» и др. [3, 4, 6].

Тенденции развития ЭШС за 10...15 лет, начиная с 1990 г. и анализ информации (около 3000 наименований из 37 стран) [3] позволили определить и систематизировать основные направления:

- создание низколегированных сталей с хорошей свариваемостью, сварные соединения которых в толщинах до 200 мм имеют требуемые свойства без последующей термообработки;
- совершенствование и создание новых присадочных материалов для сварки;
- применение новых низколегированных сталей (до 30...40 % от общего объема материалов), используемых в конструкциях, выполняемых ЭШС;
- разработка требований к качеству металла и исходным заготовкам большой толщины (до 3000 мм) из легированных сталей повышенной прочности;
- совершенствование техники и технологии ЭШС кольцевых стыков, преимущественно для крупных заготовок диаметром свыше 2500 мм;
- исследование и разработка новых типов сварных соединений при снижении удельных затрат на единицу продукции;

- разработка приемов и способов получения неразъемных соединений компактного сечения с применением электрошлакового процесса и жидкого присадочного металла.

Прогнозные оценки на будущее сварочного производства предусматривали, прежде всего, создание и применение нового поколения сварочного оборудования с программным управлением технологическим процессом ЭШС. Причем, при внедрении нового сварочного оборудования целесообразно максимально возможный уровень механизации и автоматизации сборочных и вспомогательных операций, так как они составляют до 50...70 % от времени общего цикла изготовления сварной металлоконструкции [3].

Для реализации технологий ЭШС и ЭШН крупногабаритных, нетранспортабельных металлоконструкций в монтажных условиях создавали мобильные группы, оснащенные необходимым комплектом оборудования, включая средства местной термообработки.

В сварочном производстве машиностроительных отраслей и строительстве наибольшее применение получили два способа: электрошлаковая сварка проволочным электродом (ЭШС ПЭ) и плавящимся мундштуком (ЭШС ПМ). Ими выполняются основные виды соединений (стыковые, угловые, тавровые) и типы швов (прямолинейные, кольцевые, переменного профиля). Для этих спо-

собов в ИЭС им. Е. О. Патона создан целый ряд сварочных аппаратов, среди которых серийно выпускаемые аппараты типа А-535, А-1304 и А-820К [2, 3].

В 1990 г. разработан новый аппарат для ЭШС проволочными электродами металла толщиной до 450 мм (взамен А-535), получивший индекс АШ-112 [3]. Для ЭШС стыков из низколегированных сталей типа 09Г2С толщиной 30...100 мм разработан монтажный аппарат нового поколения типа АД-381Ш (рис. 1) [7].

В 2004–2006 гг. для ЭШС неповоротных кольцевых швов крупногабаритных металлоконструкций диаметром 14000 мм и более создан двухэлектродный аппарат, не имеющий аналогов в мировой практике сварочного производства АШ 115 М (рис. 2) [8].

Для осуществления ЭШС ПМ разработаны аппараты типа АШ-110, АШ-113, и АШП113 М2 (рис. 3), обеспечивающие дублирование в процессе сварки практически всех элементов сварочной цепи (механические и электрические) [3, 9, 10]. Аппараты нового поколения модульного типа снабжены системами управления сварочным процессом и позволяют вести непрерывный мониторинг и паспортизацию параметров режима [11].

Развитие ЭШС в Украине и мировой практике продолжается как в отношении исследования собственно сварочного процесса, так и его промышленного использования.

Важным направлением развития электрошлакового процесса является регулирование ввода и распределения в зоне сварного соединения тепло-

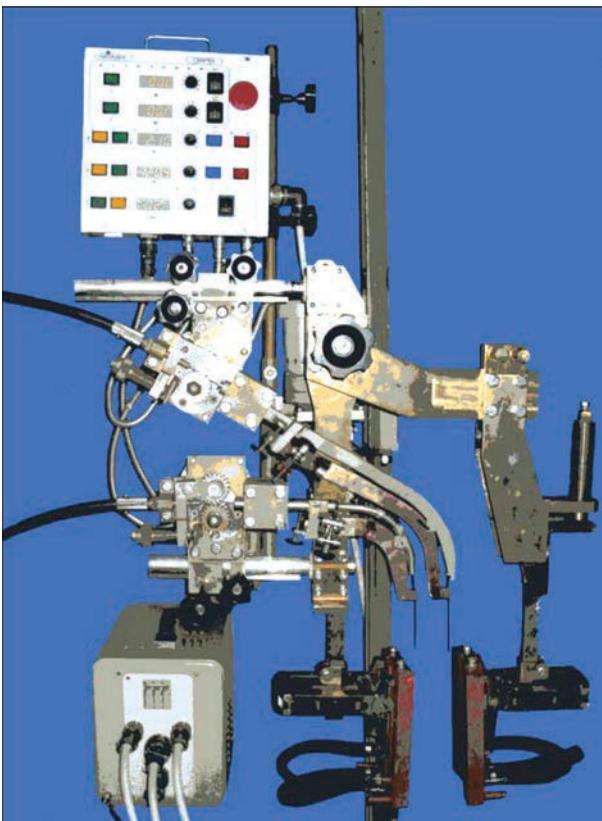


Рис. 1. Двухэлектродный аппарат АД-381Ш для ЭШС металла толщиной 30...100 мм



Рис. 2. Двухэлектродный аппарат АШ 115М2 для ЭШС неповоротных кольцевых и криволинейных стыков толщиной 40...200 мм

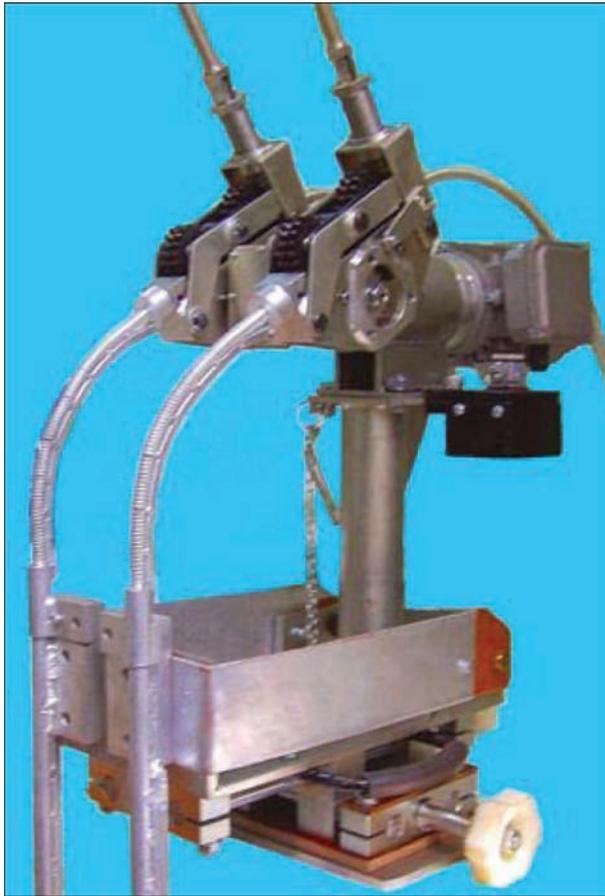


Рис. 3. Портативный двухэлектродный аппарат АПП 113М для ЭШС плавящимся мундштуком металла толщиной 40...120 мм

вой энергии для достижения термических циклов, не снижающих прочностные характеристики металла ЗТВ без последующей высокотемпературной обработки [12].

Использование конструкционных материалов повышенной прочности открывает возможности увеличения объемов применения ЭШС [13]. Эти стали малочувствительны к перегреву в зоне термического влияния (ЗТВ) [2, 14–16].

Изучением плавления электродного и основного металла в зоне сварки [17–19] установлено, что оплавление электрода в межэлектродном промежутке шлаковой ванны сопровождается образованием энергетического ядра с повышенной температурой. Размеры (объем) ядра циклически изменяются за счет поступления в него электродного металла. Соприкосновение ядра с зеркалом металлической ванны сопровождается электрогидродинамическим ударом, в результате которого металлическая ванна, принимая тепловую энергию ядра, смещается в сторону свариваемых кромок и их оплавляет. Показано, что размеры энергетического ядра, значения сварочного тока и формы металлической ванны имеют общую закономерность циклического характера. Каждый цикл завершается образованием «разряда» в ме-

таллическую ванну. На осциллограмме сварочного тока в момент такого «разряда» наблюдается пиковое возрастание тока в 3...5 раз [17, 18]. Если это будет подтверждено дальнейшими исследованиями, представится возможность определить оптимальные условия существования энергетического ядра и усовершенствовать систему управления процессом.

Высокий уровень служебных характеристик металла сварных соединений достигается при условии снижения тепловложения. Удельная погонная энергия электрошлакового сварочного процесса  $E_{св}$  для большинства случаев ЭШС металла низколегированных сталей находится в диапазоне 104...208 кДж/см<sup>2</sup> [2].

При ЭШС проволочным электродом снижение  $E_{св}$  ограничивается условиями сохранения устойчивости протекания самого процесса и удовлетворительного формирования шва.

Показано, что:

- при  $E_{св} < 45,0$  кДж/см<sup>2</sup> достигаются качественные швы (без кристаллизационных трещин) для металла толщиной 30...60 мм одним электродом ( $V_c = 3,0...5,0$  м/ч,  $V_e$  до 600 м/ч);

- в диапазоне  $V_c = 1,0...3,0$  м/ч наблюдается снижение  $E_{св}$  соответственно от 90 до 55 кДж/см<sup>2</sup>. Причем, даже повышение  $V_c$  до 7...8 м/ч не позволяет снизить  $E_{св}$  ниже 45 кДж/см<sup>2</sup>;

- ЭШС на форсированных режимах ( $V_c > 4,0$  м/ч) возможно аппаратами нового поколения при полной автоматизации процесса;

- ЭШС на форсированных режимах рекомендуется выполнять в узком зазоре (24...18 мм) порошковой проволокой диаметром 2,6...1,8 мм, а также проволокой сплошного сечения диаметром 2,0...1,6 мм;

- металл сварного соединения, полученного при значениях  $E_{св}$  (75...45 кДж/см<sup>2</sup>) ЭШС отличается более высоким качеством.

Снижение удельной погонной энергии  $E_{св}$  (на 23 %) при ЭШС титана в узком зазоре (22 мм) приводит к уменьшению ширины ЗТВ и снижает вероятность протекания нежелательных структурных превращений в основном металле.

Заслуживают внимания работы, направленные на дальнейшее развитие и совершенствование техники и технологии ремонта крупных металлоконструкций непосредственно на месте эксплуатации. Разработаны процессы восстановления дефектов (преимущественно сквозных трещин), возникающих при эксплуатации крупногабаритных нетранспортабельных металлоконструкций методом многопроходной ЭШС плавящимся мундштуком [20, 21].

Разработаны технологии и техника восстановительного ремонта рабочих элементов быстроизна-

шивающихся деталей машин с использованием ЭШН, таких как зубья крупномодульных шестерен, тяжелые молотки угольных мельниц, стальные и чугунные валки горячей прокатки. Создано сварочное оборудование и выданы практические рекомендации по их применению [22, 23].

Предложен способ ЭШС или ЭШН коррозионноустойчивыми неподвижными плавящимися секционными электродами большого сечения в узком зазоре для прямолинейных и криволинейных стыковых соединений толстого металла [24]. В зоне сварки используются электрод большого сечения и проволочный электрод, которые питаются от различных источников. Такая схема осуществления сварочного процесса позволяет эффективно использовать преимущества и исключить недостатки указанных выше способов сварки [2]. Зазор между свариваемыми кромками и неподвижным секционным электродом составляет 1,5...3,0 мм и должен быть заполнен диэлектриком керамического типа. Оптимальным материалом изоляторов служат флюсы типа АН-9У или АН-45, наносимые на поверхность электродов в виде порошков, флюсо-бумаги или флюсо-картона с добавкой вяжущих материалов (3...8 % жидкого стекла). Исследования условий протекания ЭШС показали, что при узком зазоре и большом сечении неподвижного электрода область существования стабильного процесса сужается и смещается в сторону более низких напряжений на шлаковой ванне (для канонического способа  $U_c = 52...40$  В; для данного способа  $U_c = 40...25$  В). Эффективность использования нового способа будет обеспечиваться применением источни-



Рис. 4. Внешний вид установки ЭШС плавящимся мундштуком для соединения металла, свариваемое сечение которого может достигать размеров 4000×6000 мм. (Участок ЭШС больших толщин им. Г.З. Волошкевича на ПАО «НКМЗ», г. Краматорск)



Рис. 5. Сварная заготовка траверсы гидравлического пресса. Масса заготовки 150 т, сечение шва (показано стрелкой), выполненного ЭШС плавящимся мундштуком 2490×3860 мм

ков питания для неподвижных электродов с программным управлением основных параметров режима сварки ( $U_c, I_c, P_c$ ) в заданных пределах как в ручном, так и в автоматическом цикле. Это обеспечивает уменьшение количества наплавленного металла; удовлетворительные условия образования шва при меньшей  $E_{св}$ . Происходит изменение распределения тепловой энергии по толщине свариваемых кромок, технологических возможностей получения сварных соединений, в том числе из разнородных материалов, при ремонтных работах по восстановлению крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения.

Широко применяется ЭШС проволочными электродами и плавящимся мундштуком для соединения металлов толщиной 30...100 мм [25, 26]. На ПАО «НКМЗ» совместно с ИЭС им. Е.О. Патона создана уникальная установка для ЭШС ПМ (рис. 4) металла, свариваемое сечение которого может достигать размеров 4000×6000 мм [9]. В эксплуатацию установка была введена в 2002 г. Производственному участку, где функционирует установка, было присвоено имя д.т.н. Г. З. Волошкевича, внесшего наиболее весомый вклад в создание, развитие и внедрение ЭШС. За истекшие почти 20 лет на установке были сварены уникальные металлоконструкции [27] станин прокатных станков и другого оборудования тяжелого машиностроения (рис. 5).

**Электрошлаковый сварочный процесс за рубежом.** На крупных российских предприятиях к настоящему времени объем использования ЭШС

для изготовления традиционных изделий заметно уменьшился. Отмечен рост применения этого процесса в ремонтных целях, а также для соединения негабаритных деталей большой толщины в монтажных условиях. Изменилась номенклатура изделий, восстанавливаемых с помощью электрошлаковой наплавки (ЭШН) [28]. Известны примеры возрождения участков ЭШС на машиностроительных заводах. Например, в 2016 г. выросла потребность рынка в барабанах для модульных энергетических котлов и сосудов высокого давления (баллонах). В 2017 г. в ООО «Сибэнергомаш-БКЗ» на базе аппарата А-535 восстановлена установка для ЭШС кольцевых швов барабанов [29], которая позволяет выполнять швы диаметром до 2000 мм с толщиной стенок до 150 мм. Проведена ЭШС барабана котла БКЗ-160-100 ГМ мощностью 160 т пара в час, выполняются работы по изготовлению барабана для котла Е-550-13.8-560 КТ и сосудов высокого давления (баллоны гидравлического типа БГ-10000/32). Технология ЭШС сосудов успешно используется взамен многослойной автоматической сварки под флюсом.

В 2016 г. впервые в России и впервые на Южно-Уральском машиностроительном заводе с применением ЭШС изготовлен кислородный конвертер вместимостью 320 т жидкого металла для АО «ЕВРАЗ-ЗСМК» [30]. Освоена прогрессивная технология ЭШС металла больших толщин. Для выполнения прямолинейных швов используются аппараты А-535, а для ЭШС криволинейных неповоротных стыков толщиной 40...160 мм используют аппараты АШ-115М2, разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона [8].

В АО «Атоммаш» применяется технология электрошлаковой наплавки ленточным электродом, позволяющая существенно сократить время при наплавочных работах. На установке ЭШС выполняются швы длиной до 10000 мм и толщиной до 300 мм, в том числе для изготовления толстостенных сферических днищ. Выполняются исследования с целью повышения качества изделий АЭС с применением ЭШС из чистых сталей 10ГН2МФА и 15Х2НМФА [31].

В АО «Тяжмаш», ОАО «Уралмаш» и ОАО «Пензхиммаш» эксплуатируются установки с использованием аппаратов А-535 для ЭШС кольцевых и прямолинейных стыков толщиной до 350 мм. В ОАО «Тяжмехпресс» столы станин горячештамповочных прессов номинальной силой 165 МН массой 240 т изготавливают из литых деталей с использованием ЭШС ПМ толщин до 400 мм [32]. В ОАО «Уралхиммаш» при изготовлении днища и обечаек корпуса оборудования была впервые освоена и применена ЭШН лен-

точным электродом шириной 60 мм. Применение данного метода позволило значительно сократить трудоемкость за счет того, что наплавка выполнялась без переходного слоя в один слой. Применение данного способа позволило сократить расход сварочных материалов и повысить качество наплавленной поверхности. В ОАО «Балтийский завод» в результате совместных работ с ИЭС им. Е.О. Патона при сооружении баков для металловодной защиты освоена ЭШС полотнищ размером от 4000×9000 мм до 7000×9000 мм из стали 08Х18Н10Т толщиной 40...50 мм с использованием аппарата АД-381Ш. В ОАО «Волгоцеммаш» на базе аппаратов А-645, А-535 и А-433Р эксплуатируются три участка ЭШС, где осуществляют сварку рам щековых дробилок, бандажей цементных печей, подбандажных обечаек, крышек мельниц и др. толщиной 45...1200 мм [33]. ООО «Завод пневмотранспортного оборудования» совместно с ООО «Ремакс» использует ЭШС в точный размер бандажей вращающихся цементных и металлургических печей непосредственно на предприятии заказчика. Выполняются продольные стыки обечаек металла толщиной от 60 до 120 мм, ремонт эксплуатационных трещин многопроходной ЭШС в бандажах цементных печей без их демон- тажа [34].

На ремонтно-механических заводах Братского ЛПК, ОАО «Севервостокзолото» и ОАО «Якутголь» совместно с ИЭС им. Е.О. Патона организованы участки восстановления с использованием ЭШН изношенных косозубых шестерен корообдирочных барабанов шведского производства, гребней грунтозацепов гусеничных тракторов «Комасу» и приводных шестерен механизма поворота платформы японских экскаваторов «Марион-204». Создание ремонтных участков позволило снизить закупки по импорту быстроизнашивающихся деталей.

Портал «наплавить.рф» демонстрирует электрошлаковую наплавку (ЭШН) в токоподводящем секционном кристаллизаторе штампов, пуансонов, рабочих торцов оправок трубопрошивного агрегата и других изделий диаметром до 100 мм. Установка для ЭШН в горизонтальном положении плоских поверхностей изделий позволяет формировать тонкий (от 3 мм) и широкий (до 55 мм) слой наплавленного металла при минимальной (от 1 мм) и равномерной глубине проплавления [35].

В западных странах наблюдается устойчивый рост объема исследований и применения ЭШС и ЭШН в различных отраслях промышленности.

В США способ ЭШС плавящимся мундштуком в узкий зазор был использован для изготовления двадцати сварных швов в опорной башне строя-

щегося моста в Сан-Франциско/Окленд [36]. Длина каждого однопроходного шва составляла 10 м, толщина стыков — 100 и 60 мм. При этом применяли пять типов разделки кромок. Технология ЭШС (оборудование и обучение) была предоставлена «Electroslag Systems (EST & D)» Портленд, штат Орегон, в рамках сотрудничества с Университетом Портленда и компанией «American Bridge». После сварки осуществляли ультразвуковой и рентгеновский контроль сварных соединений. Общее время сварки всех стыков составило два месяца. Использование ЭШС позволило значительно сократить сроки и трудоемкость сварочных работ, так как по предварительным расчетам общее время сварки стыков при дуговом способе составляет шесть месяцев. В 2013 г. был проведен повторный ультразвуковой контроль качества 200 м сварных швов.

Согласно материалам обзорной статьи [37] последняя модификация ЭШС в узкий зазор (ESW-NG) в настоящее время признана в США пригодной AASHTO для сварки обычных типов мостовых сталей и включена в код сварки мостов (AWS D1.5: 2010 с). Ведутся работы по включению сварки ESW-NG в код структурной сварки AWS D1.8 – сейсмическое приложение. Показано, что процесс ЭШС в узкий зазор устойчив как при постоянном, так и при переменном токе с квадратной синусоидой. Подразделение Linde Union Carbide и компания Hobart Brothers запатентовали две конструкции плавящихся мундштуков и метод ЭШС колеблющимся плавящимся мундштуком. Плоские пластины плавящихся мундштуков, имеющие канал для прохождения сварочной проволоки, которыми заменили мундштуки круглого сечения, позволили уменьшить зазор с 32 до 19 мм. Способ ESW-NG рассчитан для использования при монтаже на месте сооружения стальной конструкции. Он особенно приемлем для сварки тяжелых фланцев большой длины W-образных форм, стыки которых имеют отклонение от вертикали 45-50 град. Для сварки тяжелой колонны с использованием электродуговой сварки под флюсом требуется 30 ч или более. Для сравнения, для сварки обоих фланцев любой толщины, используя ESW-NG, требуется около 30 мин. Таким образом, авторы обзора [37] резюмируют следующее. ЭШС больше не рассматривается как единственный вариант для соединения толстых пластин в цеховых условиях. Он может использоваться и быть экономически выгодным в монтажных условиях при сварке ребер жесткости и опорных плит с фланцами стальных профилей, а также при соединении диафрагм к внутренним стенкам коробчатых колонн. Современные достижения в области ЭШС,

воплощенные в ESW-NG, используются на строительных площадках крупных высотных зданий и в строительстве мостов. ESW-NG зарекомендовал себя как наиболее экономичный метод для многих соединений, в том числе производства сварных швов большой толщины в стальных мостах и зданиях.

Фирма «Arcmatic Welding Systems» (США) специализируется на модульных системах с компьютерным программируемым управлением процесса сварки, специально разработанным для ЭШС толстых пластин [38]. Предлагаются портативные системы для ЭШС плавящимся мундштуком с ручным управлением консолью, на которой закреплены каналы подачи электродной проволоки, силовые кабели и шланги подачи охлаждающей воды. Применяют также установки на базе двухпозиционного манипулятора, обеспечивающие быструю (5 мин) ее переналадку с дугового метода сварки на ЭШС металла толщиной до 300 мм. Указанное оборудование предлагается для изготовления ветровых башен, морских платформ, тяжелых сосудов под давлением, балок и колонн из конструкционной стали, мостовых балок и других конструкций. Наибольшее применение установки находят при ЭШС ПМ диафрагм строительных колонн.

Советом по исследованиям транспорта (TRB) Национальной академии США проведены исследования по сварке железнодорожных рельсов с использованием ЭШС. Сравнение и анализ с ЭШС показали, что термитная сварка рельсов — процесс менее капиталоемкий, менее дорогой, более портативный, но сварные швы низкого качества. Средняя стоимость выполненных термитных швов составляет 350 дол. США для каждого стыка. Соединения, полученные другими способами сварки, более дороги, порядка 500 дол. США каждый. Контактная сварка очень капиталоемкая и, следовательно, дорогостоящая, требует использования поездов для транспортировки рельсосварочных машин. Предполагается, что ЭШС займет позицию между двумя указанными, будет сопоставима по качеству и стоимости (около 250 дол.).

Типичные области применения электрошлаковой сварки в Японии в XX веке включали следующие объекты: соединение больших отливок, ребра жесткости верхней палубы судов, продольные сварные швы в цилиндрических сосудах под давлением, корпуса доменных и кислородных печей. Однако низкая ударная вязкость металла ЗТВ сварного шва явилась самым большим препятствием для увеличения использования ЭШС в Японии. Для расширения номенклатуры изделий, изготавливаемых с применением ЭШС, вы-

полнены исследования с целью увеличения ударной вязкости металла ЗТВ [39, 40], за счет стали, малочувствительной к росту зерна в ЗТВ [15, 16]. С целью увеличения объема применения ЭШС сталей, имеющих предел прочности на разрыв 490...590 МПа, Nippon Steel Corporation разработала новую технологию повышения ударной вязкости металла ЗТВ, которая называется Super High HAZ Toughness Technology с тонкой микроструктурой (HTUFF®). Это технология, при которой термически стабильные оксиды и сульфиды, содержащие Mg и Ca, диспергированы в стали в виде мелких частиц, рост  $\gamma$ -зерен в металле ЗТВ вблизи линии сварки сварного соединения существенно задерживается мелкими частицами, и в результате реализуется эффект измельчения зерна и достигается ударная вязкость в металле ЗТВ по Шарпи при  $0^\circ\text{C} \geq 70$  Дж. Металл толщиной 60 и 80 мм в соответствии с разработанной технологией широко используется при изготовлении с использованием ЭШС шельфовых конструкций, труб, зданий и гражданском строительстве. Общая масса использованной для ЭШС стали составила порядка 280 000 т [16]. С начала XXI века в японском судостроении резко возросло производство крупных морских контейнеровозов, грузочные люки которых необходимо изготавливать из стальных листов толщиной 70...100 мм [41]. Для выполнения однопроходной сварки стали такой толщины с использованием способов сварки с большим тепловложением (дуговая сварка с принудительным формированием и ЭШС) разработана технология производства стали ТМСП, включающая контролируемую прокатку и термическую обработку в интервале температур  $A_{c1}-A_{c3}$ . Технология позволяет заметно повысить прочность и ударную вязкость путем измельчения зерна с образованием бейнита или мартенсита с добавлением микролегирующих элементов, таких как титан и ниобий. Разработаны высокопрочные стали с пределом текучести 390 и 460 Н/мм<sup>2</sup>, при ЭШС которых исключается образование грубой структуры в металле ЗТВ. Стали, созданные с применением технологий ТМСП и HTUFF, применяются при изготовлении танкеров, сухогрузов, судов для транспортировки сжиженного нефтяного и природного газа, что позволило снизить массу судов и повысить эффективность перевозок.

В последние годы в Канаде разработан процесс ЭШС алюминиевых шин [42]. Компания CANMEC (провинция Квебек) приобрела разработки фирмы Linde по применению технологии ЭШС для сварки алюминия толщиной 50 мм. Для сварки шин толщиной 275 мм компания CANMEC совместно с CQRDA (Квебекский центр исследо-

ваний и разработок по алюминию) и Национальным исследовательским советом Канады (NRC) разработали новые аппараты, обеспечивающие подачу трех-, ... пятиэлектродных проволок и технологию ЭШС. Новую технологию применили при строительстве алюминиевого завода (346 000 т/г) в Исландии. Алюминиевые шины были заварены ЭШС в 4 раза быстрее по сравнению с традиционным методом сварки (дуговой метод «шахматной пластины»). Швы обеспечили высокое качество сварных соединений, электропроводимость шин в зоне шва была увеличена на 20 % минимум. За счет полного провара кромок снижены электрические потери.

Китайские предприятия предлагают приобрести аппараты и установки консольного и порталного типа для ЭШС проволочными электродами и плавящимся мундштуком, а также флюс HJ431 [43]. Указанное оборудование предназначено для ЭШС крышек корпусов строительных балок и поперечных перегородок колонн. Толщина свариваемых стыков в основном составляет 16...65 мм. Исследовательская группа Хунаньской провинциальной академии строительства провела обширный анализ свариваемости высокопрочной арматуры HRB400 как теоретически, так и экспериментально. Применяется ЭШС арматуры из упрочненной стали марки 20MnSiV [44]. Тайваньская фирма Kingarc Autoweld демонстрирует упрощенный аппарат для ЭШС плавящимся трубчатым мундштуком диафрагм строительных колонн.

В Турции опубликована статья «Электрошлаковый сварочный процесс и его применение», где описана история создания и развития ЭШС в развитых странах [45]. Там же изложен турецкий опыт применения ЭШС и перспективы ее применения. В настоящее время с помощью ЭШС осуществляют сварку кольцевых стыков прессов, печей, корпусов двигателей, колес для асфальтовых машин. Сваривают стыки судовых пластин и отливок деталей толщиной 13...400 мм на химических, нефтяных, морских и энергетических установках. Приведены примеры применения ЭШС низколегированных углеродистых сталей: сосуды под давлением, цистерны, котлы, компрессоры, мосты, топливозаправщики с двойной стенкой корпуса. В Турции используют ЭШС в качестве способа сварки, который обеспечивает более эффективные результаты по сравнению с традиционными методами. Наиболее часто используются диаметры электродных проволок 2,4 и 3,2 мм. Кроме того, также успешно применяют проволоки диаметром от 1,6 до 4,0 мм. Используют катушки для электродных проволок двух типов: малые для

намотки 27 кг и большие для 270 кг проволоки. Планируется применение ЭШС для изготовления ядерных реакторов, строительства промышленных зданий, топливных баков с двойными стенками и других конструкций.

В Италии используют ЭШС тремя проволочными электродами для соединения низкоуглеродистых стальных пластин толщиной от 25 до 300 мм в вертикальном или близком к вертикальному положении [46].

Австрийская фирма «Voestalpine Böhler Welding» предлагает оборудование, технологию и сварочные материалы для электрошлаковой облицовки (ESSC) ленточным электродом шириной 15...120 мм [47]. Показаны преимущества этого процесса по сравнению с электродуговой наплавкой ленточным электродом под флюсом. Например, производительность ЭШН достигает 23 кг/ч, а электродуговой — не более 14 кг/ч. Разбавление наплавленного металла основным не превышает 7 %. При электродуговой наплавке оно достигает 18 %. Отмечается, что благодаря электромагнитному управлению процессом формирования наплавленного металла, при ЭШН лентой обеспечивается идеально ровная наружная поверхность наплавленного металла и качественное перекрытие слоев. Приведены примеры ЭШН ленточным электродом нелегированных, низколегированных, мартенситных, нержавеющей сталей, никелевых сплавов, а также сплавов кобальта и меди. В нефтяной и газовой промышленности ЭШН ленточным электродом применяется для создания антикоррозионных покрытий большой площади в таком оборудовании, как сосуды под давлением, сепараторные сосуды и сепараторы высокого давления. Электрошлаковая облицовка также широко используется для наплавки внутренней поверхности труб, клапанов для транспортировки нефти и газа. В химической и целлюлозно-бумажной промышленности этот процесс нашел свое применение в оборудовании, подверженном воздействию коррозионных сред, высоких давлений и температур. Наиболее эффективно процесс используется для антикоррозионной наплавки сосудов, резервуаров, клапанов, насосов, компрессоров, барабанов для производства бумаги, мешалок и т. д. В энергетической промышленности ЭШН ленточным электродом применяют для облицовки внутренних поверхностей реакторных сосудов, парогенераторов и т. д. В Бельгии, Германии [48], Индии [49] и Польше [50] процесс ЭШН ленточным электродом нашел свое применение в аналогичных отраслях промышленности взамен газопламенной наплавки и плакирования лентой под флюсом. Фирма ЭСАБ (Швеция) применяет ЭШН

ленточным электродом (ширина 60...90 мм, толщина 0,5 мм) для антикоррозионной наплавки сталей 316L или 347 — на углеродистую сталь [51]. ЭШН нержавеющей и никелевых слоев применяется для ремонта прокорродированного оборудования и улучшения коррозионных свойств новых конструкций. В Норвегии применяют ЭШН лентой для облицовки внутренних поверхностей металлургических труб CLAD диаметром до 254 мм и длиной до 12,5 м. Типичные размеры ленточных электродов составляют 15/20/30×0,5 мм, из сплавов инконель 625, 825, 316. Производительность наплавки в зависимости от размера ленты достигает 12...24 кг/ч.

В Эстонии в результате совместных работ с ИЭС им. Е.О. Патона на базе концерна «Эстонсланец» организован участок восстановления изношенных зубьев крупномодульных вал-шестерен привода поворота платформы шагающих экскаваторов ЭШ 15/90 и ЭШ 10/70 с использованием ЭШН. Вал-шестерни, восстановленные без последующей механической обработки эвольвентных профилей, успешно эксплуатируются в разрезах Нарвский и Айду.

## Выводы

1. За истекший период с начала XXI века в Украине и за рубежом заметно уменьшился объем использования ЭШС при изготовлении и ремонте изделий толщиной более 100 мм, тем не менее в последние годы отмечается устойчивый рост объемов ее применения для соединения металла толщиной 30...100 мм.

2. Создана гамма нового сварочного оборудования, отличающегося высокой надежностью выполнения ЭШС и обеспечивающая непрерывный мониторинг и паспортизацию основных параметров режима. Разработаны новые технологии, позволившие расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых с применением ЭШС и ЭШН. В настоящее время наибольшее распространение получили методы ЭШС трубчатым плавящимся мундштуком (диафрагмы, ребра жесткости, элементы усиления и др. строительных колонн, мостов), а также методы ЭШН электродной лентой и плавящимся мундштуком (создание защитных покрытий, восстановление изношенных деталей машин и др.).

3. В ближайшие 5–10 лет ожидаются: расширение объемов ЭШС проволочным электродом, а также трубчатым плавящимся мундштуком в узком зазоре при производстве крупногабаритных конструкций (в первую очередь строительных) из металла с пониженной чувствительностью к перегреву в ЗТВ, выполняемых в цеховых и монтажных

условиях; получение крупных лито-сварных, прокато-сварных и сварно-кованых заготовок для потребностей тяжелого машиностроения с размерами поперечного сечения до 4000×6000 мм, которые можно осуществлять по технологии ЭШС плавящимся мундштуком, успешно применяемой на ПАО «НКМЗ»; расширение областей применения процесса ЭШН ленточным электродом для создания антикоррозионных покрытий большой площади для сосудов и сепараторов высокого давления, резервуаров, клапанов, насосов, компрессоров, парогенераторов, труб, эксплуатируемых в нефтяной, газовой, энергетической, химической и других отраслях промышленности; увеличение объемов применения технологий восстановительного ремонта металлоконструкций и быстроизнашивающихся деталей машин на основе использования ЭШС проволочными электродами, многопроходной ЭШС и новых методов ЭШН.

### Список литературы

1. Волошкевич Г.З. (1956) *Способ электрической сварки плавлением*. А. с. 104248 СССР, МПК 21 В 29/13.
2. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
3. Сушук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. (1990) *Технология и оборудование для электрошлаковой сварки*. Киев, ИЭС.
4. Патон Б.Е., Дудко Д.А., Ющенко К.А. и др. (1997) Электрошлаковая сварка: основные итоги, задачи и перспективы развития. *Автоматическая сварка*, **5**, 32–42.
5. Медовар Б.И., Цикуленко А.К., Богаченко А.Г., Литвинчук В.М. (1982) *Электрошлаковая технология за рубежом*. Киев, Наукова думка.
6. Лычко И.И., Сушук-Слюсаренко И.И., Ющенко К.А., Блинов В.А. (1999) Особенности ЭШС толстостенных протяженных стыков из стали типа 18-8. *Автоматическая сварка*, **9**, 61–65.
7. Ланкин Ю.Н., Москаленко А.А., Тюкалов В.Г. и др. (2008) Опыт применения электрошлаковой сварки при монтаже металлургического оборудования. *Сварочное производство*, **6**, 32–36.
8. Жук Г.В., Семененко А.В., Великий С.И. и др. (2016) Установка АШ115М2 для электрошлаковой сварки вертикальных, наклонных и криволинейных стыковых соединений. *Автоматическая сварка*, **10**, 47–49.
9. Невидомский В.А., Гулида В.П., Ющенко К.А. и др. (2002) Новая установка для ЭШС больших толщин на АО «НКМЗ». *Там же*, **2**, 50–52.
10. Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. и др. (2012) Портативный аппарат для электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком. *Там же*, **8**, 48–49.
11. Ланкин Ю.Н. (2007) Компьютерная система контроля технологических параметров ЭШС. *Там же*, **5**, 33–40.
12. Патон Б.Е., Дудко Д.А., Пальти А.М. и др. (1999) Электрошлаковая сварка (перспективы развития). *Там же*, **9**, 4–6.
13. Егорова С.В., Стеренбоген Ю.А., Юрчишин А.В. и др. (1980) Новые конструкционные стали, не требующие нормализации после электрошлаковой сварки. *Там же*, **6**, 44–47.
14. Синюк А.Г., Демченко Ю.В., Проскудин В.Н. и др. (2015) Обоснование экономической эффективности применения различных способов сварки и сталей для ремонта кожуха доменной печи № 4 ПАО № МК «Азовсталь». *Сварщик*, **4**, 18–21.
15. Akihiko Kojima, Akihito Kiyose, Ryuji Uemori et al. (2004). Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles. *Nippon Steel Technical Report*, 90, July 1–6.
16. Akihiko Kojima, Ken-Ichi Yoshii, Tomohiko Hada (2014) Development of High HAZ Toughness Steel Plates for Box Columns with High Heat Input Welding. *Nippon Steel Technical Report No*, 90 July 39–49.
17. Патон Б.Е., Лычко И.И., Ющенко К.А. и др. (2013) Плавление электрода и основного металла при электрошлаковой сварке. *Автоматическая сварка*, **7**, 33–40.
18. Лычко И.И., Ющенко К.А., Супрун С.А., Козулин С.М. (2019) Особенности плавления электрода и основного металла при электрошлаковой сварке. *Там же*, **3**, 12–17.
19. Ланкин Ю.Н., Суший Л.Ф. (2009) Электропроводность шлаковой ванны при электрошлаковой сварке проволочным электродом. *Там же*, **12**, 47–49.
20. Ланкин Ю.Н., Тюкалов В.Г., Москаленко А.А. (2004) Применение электрошлаковой сварки при ремонте корпуса доменной печи на ОАО «КГМК Криворожсталь». *Там же*, **5**, 30–32.
21. Ющенко К.А., Козулин С.М., Лычко И.И., Козулин М.Г. (2014) Соединение металла большой толщины многопроходной электрошлаковой сваркой. *Там же*, **9**, 32–36.
22. Козулин С.М., Лычко И.И., Подыма Г.С. (2008) Электрошлаковая наплавка зубьев вал-шестерни вращающейся обжиговой печи. *Там же*, **5**, 38–41.
23. Кусков Ю.М. (1999) Наплавка в токоведущем кристаллизаторе – перспективное направление развития электрошлаковой технологии. *Там же*, **9**, 76–80.
24. Патон Б.Е., Ющенко К.А., Лычко И.И. (2003) *Способ электрошлакового зварювання чи наплавлення*. Україна, Пат. 68576 А.
25. Ланкин Ю.Н., Демченко Ю.В., Москаленко А.А. и др. (2019) Электрошлаковая сварка заготовки корпуса тягового электродвигателя на ЧАО НПО «Днепропресс». *Сварщик*, **3**, 28–29.
26. Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. и др. (2018) Применение электрошлаковой сварки в строительстве. *Автоматическая сварка*, **9**, 29–34.
27. Шаповалов К.П., Белинский В.А., Мерзляков А.Е. и др. (2016) Электрошлаковая сварка крупногабаритной станины пресса. *Там же*, **8**, 43–46.
28. Зорин И.В., Соколов Г.Н., Цурихин С.Н. и др. (2005) Восстановление рабочих поверхностей деталей и инструмента сборочно-сварочной оснастки электрошлаковым способом композиционными жаропрочными материалами. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, **5**, 17–20.
29. <http://www.energyland.info/analytic-show-165713>. (Сделано в СССР: электрошлаковая сварка толстостенных сосудов возрождена «Сибэнергомаш-БКЗ») 24.11.2017. Интернет-портал сообщества ТЭК.
30. [24ri.ru/down/open/tehnologicheskij-proryv-v-proizvodstvenno-konverterov-na-juzhuralmashe.html](http://24ri.ru/down/open/tehnologicheskij-proryv-v-proizvodstvenno-konverterov-na-juzhuralmashe.html). 16.07.2016.
31. Подрезов Н.Н. (2017) *Разработка технологических основ электрошлаковой сварки чистых корпусных сталей АЭС*: автореф. дис. ... канд. техн. наук.
32. Мерабишвили М.О. (2013) ОАО «Тяжмехпресс» – лидер по выпуску кузнечно-прессового оборудования. *Заготовительные производства в машиностроении*, **10**, 15–18.
33. Козулин М.Г. (1999) ЭШС в цементном машиностроении. *Автоматическая сварка*, **9**, 55–60.
34. <http://www.zpto-ilt.ru/service>.
35. <http://naplavka34.ru>.
36. Turpin, B., Danks D., Callaghan I., Wood W. (2012) Narrow gap electrosag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, 91(5), 24-31.
37. Janice J., Chambers, Brett R. Manning. (2016) Electrosag welding: From Shop to Field. *STRUCTURE magazine*, February, 20–23.
38. [https://www.arcmatic.com/index.php?option=com\\_content&view=featured&Itemid=124](https://www.arcmatic.com/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=124).
39. Kitani Y., Ikeda R., Ono M. et al. (2013) Improvement of weld metal toughness in high heat input electro-slag welding of low carbon steel. *Welding in the World*, February.

40. Takahiko Suzuki, Takumi Ishii (2017) Guidebook for Preventing Brittle Fractures of Inner Diaphragm Electro-slag Welds. *Steel Construction Today & Tomorrow*, **52**, 9–12.
41. Ryuji Uemori, Masaaki Fujioka, Takehiro Inoue, Masanori Minagawa et al. (2012). Steels for Marine Transportation and Construction. *Nippon Steel Technical Report*, **101**, November, 37–46.
42. (2015) Electroslag Welding (ESW): A new option for smelters to weld aluminum bus bars. Bertrand Leroux. Canmec Inc, 1750 La Grande, Chicoutimi, Quebec, G7K 1H7, Canada. Light Metals, Margaret Hyland (ed.). TMS (*The Minerals, Metals & Materials Society*).
43. www.hwayuan.com.
44. Xu C., Chen Y. и Liu Y. (2003). *Исследование и применение высокопрочного арматурного стержня – симпозиум Vanitec*, Ханчжоу, Китай, октябрь 2003 г., 106–109.
45. Kaluç E., Taban E., Dhooge A. (2006) Elektrocruruf Kayanak Yöntemi ve Endüstriyel Uygulamaları (Electroslag Welding Process And Industrial Applications). *Metal Dünyası*, Ocak 2006 Sayı: 152. Yıl:13, Sayfa 100–104.
46. www.steelmeccald.it/eng/products.
47. www.voestalpine.com/welding.
48. https://www.haane.de/.
49. Takare Niraj S., Ram Yadav (2014) Electroslag strip cladding process. Mechanical Engineering/SSJCET College, India. International OPEN ACCESS Journal of Modern Engineering Research (IJMER).
50. www.oerlikon-welding.com.
51. https://www.offshore-mag.com.

## References

1. Voloshkevich, G.Z. (1956) *Method of electric fusion welding. USSR author's cert.* 104248, Int. Cl. 21 B 29/13 [in Russian].
2. (1980) *Electroslag welding and surfacing. Ed. by B.E. Paton.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I. (1990) *Technology and equipment for electroslag welding.* Kiev, PWI [in Russian].
4. Paton, B.E., Dudko, D.A., Yushchenko, K.A. et al. (1997) Electroslag welding: Main results and prospects of development. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 32-42 [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Bogachenko, A.G., Litvinchuk, V.M. (1982) *Electroslag technology abroad.* Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Lychko, I.I., Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Yushchenko, K.A., Blinov, V.A. (1999) Peculiarities of ESW of thick-wall extended butt joints from steel of 18-8 type. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 61-65 [in Russian].
7. Lankin, Yu.N., Moskalenko, A.A., Tyukalov, V.G. et al. (2008) Experience of application of electroslag welding in mounting of metallurgical equipment. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 32-36 [in Russian].
8. Zhuk, G.V., Semenenko, A.V., Lychko, I.I. et al. (2016) Ash115M2 machine for electroslag welding of vertical, inclined and curvilinear butt joints. *The Paton Welding J.*, **10**, 44-45.
9. Nevidomsky, V.A., Krasilnikov, S.G., Panin, A.D. et al. (2002) New machine for electroslag welding of large parts at JSC «NKMBF». *Ibid.*, **2**, 49-51.
10. Yushchenko, K.A., Lychko, I.I., Kozulin, S.M. et al. (2012) Portable apparatus for consumable-nozzle electroslag welding. *Ibid.*, **8**, 45-46.
11. Lankin, Yu.N. (2007) Computer system of monitoring the technological parameters of ESW. *Ibid.*, **5**, 48-50.
12. Paton, B.E., Dudko, D.A., Palti, A.M. et al. (1999) Electroslag welding (Prospects of development). *Avtomatich. Svarka*, **9**, 4-6 [in Russian].
13. Egorova, S.V., Sterenbogen, Yu.A., Yurchishin, A.V. et al. (1980) New structural steels not requiring normalizing after electroslag welding. *Ibid.*, **6**, 44-47 [in Russian].
14. Sineok, A.G., Demchenko, Yu.V., Proskudin, V.N. et al. (2015) Substantiation of economic efficiency for application of different methods of welding and steels for repair of blast-furnace jacket No. 4 of PJSC «Azovstal Iron and Steel Works». *Svarshchik*, **4**, 18-21 [in Russian].
15. Akihiko Kojima, Akihito Kiyose, Ryuji Uemori et al. (2004) Super high HAZ toughness technology with fine microstructure imparted by fine particles. *Nippon Steel Technical Report*, No. 90, July 1-6.
16. Kojima, Ken-Ichi Yoshii, Tomohiko Hada (2014) Development of high HAZ toughness steel plates for box columns with high heat input welding. *Nippon Steel Technical Report*, No. 90, July 39-49.
17. Paton, B.E., Lychko, I.I., Yushchenko, K.A. et al. (2013) Melting of electrode and base metal in electroslag welding. *The Paton Welding J.*, **7**, 31-38.
18. Lychko, I.I., Yushchenko, K.A., Suprun, S.A., Kozulin, S.M. (2019) Peculiarities of electrode and base metal melting in electroslag welding. *Ibid.*, **3**, 6-10.
19. Lankin, Yu.N., Sushy, L.F. (2009) Electrical conductivity of slag pool in electroslag welding with wire electrode. *Ibid.*, **12**, 37-38.
20. Lankin, Yu.N., Tyukalov, V.G., Moskalenko, A.A. et al. (2004) Application of electroslag welding in repair of blast furnace body at OJSC «KGMK Krivorozhstal». *Ibid.*, **5**, 26-28.
21. Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (2014) Joining of thick metal by multipass electroslag welding. *Ibid.*, **9**, 30-33.
22. Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Podyma, G.S. (2008) Electroslag surfacing of rotating kiln gear shaft teeth. *Ibid.*, **5**, 31-34.
23. Kuskov, Yu.M. (1999) Surfacing in current-conducting mould – perspective direction for development of electroslag technology. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 76-80 [in Russian].
24. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Lychko, I.I. (2003) *Method of electroslag welding or surfacing.* Ukraine Pat. 68576A [in Ukrainian].
25. Lankin, Yu.N., Demchenko, Yu.V., Moskalenko, A.A. et al. (2019) Electroslag welding of billet of body of traction electric motor at PJSC NPO «Dneprogress». *Svarshchik*, **3**, 28-29 [in Russian].
26. Yushchenko, K.A., Lychko, I.I., Kozulin, S.M. et al. (2018) Application of welding in construction. *The Paton Welding J.*, **9**, 23-27.
27. Shapovalov, K.P., Belinsky, V.A., Merzlyakov, A.E. et al. (2016) Electroslag welding of large-sized press frame. *Ibid.*, **8**, 36-39.
28. Zorin, I.V., Sokolov, G.N., Tsurikhin, S.N. et al. (2005) Restoration of working surfaces of parts and assembly-welding tooling by electroslag method using composite heat-resistant materials. *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii*, **5**, 17-20 [in Russian].
29. (2017) Made in USSR: Electroslag welding of thick-wall vessels is renewed at Sibenergomash-BKZ. TEK Community. <http://www.energyland.info/analytic-show-165713>.
30. (2016) 24ri.ru/down/open/tehnologicheskij-proryv-v-proizvodstve-konverterov-na-juzhuralmashe.html.
31. Podrezov, N.N. *Development of technological bases of electroslag welding of pure vessel steels for NPP.* In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree [in Russian].
32. Merabishvili, M.O. (2013) LLC «Tyazhmekhpres» is a leader on manufacturing of press-forging equipment. *Zagotovitelnye Proizvodstva v Mashinostroenii*, **10**, 15-18 [in Russian].
33. Kozulin, M.G. (1999) ESW in cement engineering. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 55-60 [in Russian].
34. <http://www.zpto-tlt.ru/service>.
35. <http://naplavka34.ru>.
36. Turpin, B., Danks D., Callaghan I., Wood W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San-Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, 91(5), 24-31.
37. Janice, J., Chambers, Brett R. Manning (2016) Electroslag welding: From shop to field. *Structure Magazine*, February, 20-23.
38. [https://www.arcmatic.com/index.php?option=com\\_content&view=featured&Itemid=124](https://www.arcmatic.com/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=124).

39. Kitani, Y., Ikeda, R., Ono, M. et al. (2013) Improvement of weld metal toughness in high heat input electro-slag welding of low carbon steel. *Welding in the World*, February.
40. Takahiko Suzuki, Takumi Ishii (2017) Guidebook for preventing brittle fractures of inner diaphragm electroslag welds. *Steel Construction Today and Tomorrow*, **52**, 9-12.
41. Ryuji Uemori, Nasaaki Fujioka, Takehiro Inoue, Masanori Minagawa et al. (2012) Steels for marine transportation and construction. *Nippon Steel Technical Report*, No. 101, November, 37-46.
42. Leroux, B. (2015) Electroslag welding (ESW): *A new option for smelters to weld aluminum bus bars*. Ed. by M. Hyland. The Minerals, Metals & Materials Society, Canada.
43. www.hwayuan.com.
44. Xu, C., Chen, Y., Liu, Y. (2003) Study and application of high-strength reinforcing bar. In: *Proc. of Vanitec Symp. (China, Hangzhou, October 2003)*, 106-109.
45. Kaluc, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) Electroslag welding process and industrial applications. *Metal Duniyasi*, **152**(13), 100-104.
46. www.steelmecsalda.it>eng>products.
47. www.voestalpine.com/welding.
48. https://www.haane.de/.
49. Takare Niraj S., Ram Yadav (2014) Electroslag strip cladding process. Mechanical Engineering/SSJCET College, India. International OPEN ACCESS Journal of Modern Engineering Research (IJMER).
50. www.oerlikon-welding.com.
51. https://www.offshore-mag.com.

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ПРОЦЕС. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ (Огляд)

Б.Є. Патон, К. А. Ющенко, С. М. Козулін, І. І. Личко

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

Викладені результати аналітичного огляду досліджень і промислового застосування електрошлакового зварювання і наплавлення в Україні, а також зарубіжних країнах з початку ХХІ століття. Аналіз показав, що об'єм застосування електрошлакового зварювання металу в галузях промисловості помітно зменшився, проте останніми роками відзначається стійке зростання її застосування у будівництві мостів, висотних будівель, суднобудуванні, а також при ремонті великих деталей машин на місці їх експлуатації. Розроблені малочутливі до зростання зерна в ЗТВ сталі дозволили значно розширити номенклатуру виробів, що виготовляються із застосуванням електрошлакового зварювання. Істотно збільшився об'єм застосування ЕШН стрічковим електродом для антикорозійних покриттів в посудинах високого тиску, сепараторах, парогенераторах і іншому устаткуванні, яке експлуатується в нафтогазовій, енергетичній, металургійній, целюлозно-паперовій і хімічній промисловості. Бібліопр. 51, рис. 5.

*Ключові слова:* електрошлакове зварювання, електрошлакове наплавлення, технологія, дротяний електрод, плавкий мундштук, стрічковий електрод, питома погонна енергія, сталь, тепловкладення, зона термічного впливу, ударна в'язкість

## ELECTROSLAG WELDING PROCESS: ANALYSIS OF STATE AND TENDENCIES OF DEVELOPMENT (Review)

B.E. Paton, K.A. Yushchenko, S.M. Kozulin, I.I. Lychko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper provides the results of analytical review of researches and commercial application of electroslag welding and surfacing in Ukraine as well as foreign countries from the beginning of XXI century. The analysis showed that volume of application of electroslag welding of large thickness metal (more than 100 mm) in different branches of industry noticeably reduced, however, stable growth of its application in the recent years is noted in construction of bridge and high-rise buildings, ship building as well as repair of large parts of machines on-site. New steels have low sensitivity to grain growth in a heat affected zone, allowed expanding range of products made by electroslag welding. There is a considerable increase of volume of application of electroslag surfacing with strip electrode for anticorrosion coatings in pressure vessels, separators, steam generators, compressors and other equipment, being operated in oil and gas, power, metallurgical, paper-and-pulp and chemical industries. 51 Ref., 5 Fig.

*Keywords:* electroslag welding, electroslag surfacing, welding equipment, technology, wire electrode, consumable nozzle, strip electrode, specific rate of energy input, steel, heat input, heat affected zone, impact toughness

Поступила в редакцію 19.07.2019

## Міжнародна конференція «ТИТАН 2020: Виробництво та застосування»

1–3 червня 2020 р., Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
тел. 38044 200-82-77, journal@paton.kiev.ua

## ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ\*

Турък Э., Банасик М., Стано С., Урбаньчык М.

Исследовательская сеть Лукасевич — Институт сварки, г. Гливице, Польша.  
44100, г. Гливице, ул. Бл. Чеслава 16-18, Польша

Применение гибридной лазерно-дуговой сварки лазер + MAG для соединения элементов крупных конструкций из нержавеющей стали является относительно новой проблемой. В работе обсуждены вопросы технологии гибридной сварки аустенитной стали X2CrNi18-9 и аустенитно-ферритной X2CrNiMoN21-5-1 с использованием дискового лазера мощностью 12 кВт. Определены технологические условия гибридной сварки с полным проплавлением стыковых соединений стали толщиной 8, 12 и 20 мм, а также тавровых соединений со стыковым швом с частичным проплавлением. Указаны типичные дефекты сварных швов высоколегированных нержавеющей сталей, выполненных гибридной сваркой. Библиогр. 5, рис. 20.

*Ключевые слова:* гибридная сварка, лазер+дуга, активный газ, нержавеющие стали, параметры дуги и луча, расположение источников, типичные дефекты сварки

Гибридно лазерно-дуговая сварка является процессом интенсивно изучаемым, развиваемым и внедряемым в течение последних лет [1–5]. Применение гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом (ГЛДСПЭ) лазер + сварка сплошной проволокой в инертном и активном газе (процесс ИСО 4063: 521 + 135) для соединения деталей крупных конструкций из нержавеющей стали является относительно новой проблемой. Способ гибридной сварки технологически сложен — необходимо выбрать параметры сварочной дуги и лазерного луча, подходящую смесь защитного газа и пространственное расположение обоих используемых источников энергии (конца электродной проволоки и пятна фокусировки луча) по отношению друг к другу и по отношению к линии стыка кромок для каждого типа соединения. В данной работе обсуждены вопросы технологии гибридной сварки лазер + MAG аустенитной стали X2CrNi18-9 и ферритно-аустенитной X2CrNiMoN21-5-1 с использованием дискового лазера мощностью 12 кВт и специальной гибридной головки.

**Результаты экспериментов.** Технологические испытания по подбору защитного газа при гибридной сварке стали X2CrNi18-9 с применением электродной проволоки G 19 9 L Si и стали X2CrNiMoN21-5-1 с применением электродной проволоки G 22 9 3 N L показали, что стабильность гибридного процесса, требуемую форму швов и минимальное разбрызгивание обеспечивает газовая смесь 97,5% Ar + 2,5% CO<sub>2</sub>.

Глубина проплавления и ширина стыкового соединения были измерены для четырех значений диаметра используемого световода (200, 300, 400, 600 мкм) и двух направлений движения гибридной головки: с лазером как ведущим источником тепла

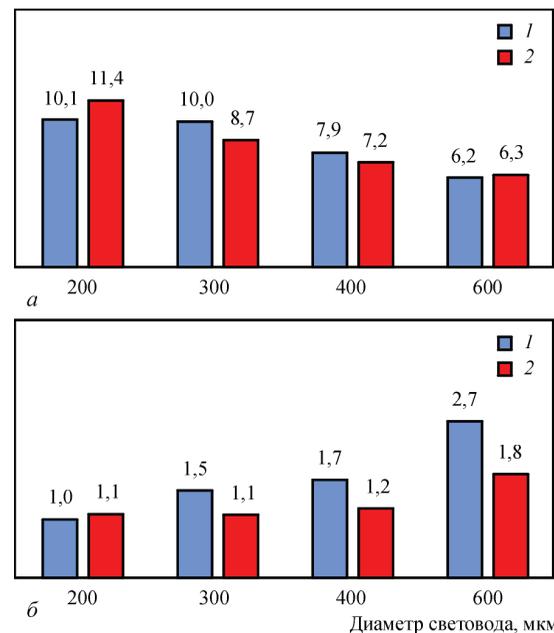


Рис. 1. Изменение глубины проплавления (а) и ширины нижней части (б) сварного шва для разных значений диаметра используемого световода и направления движения гибридной головки. Для а: 1 — глубина проплавления L — А, мм; 2 — глубина проплавления А — L, мм; для б: 1 — ширина нижней части шва L — А, мм; 2 — ширина нижней части шва А — L, мм

\* Публикуется по материалам доклада, представленного на международной конференции «Інноваційні технології та інжинірінг у зварюванні і споріднених процесах – POLYWELD 2019», г. Киев, 23–24 мая 2019 г., НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».

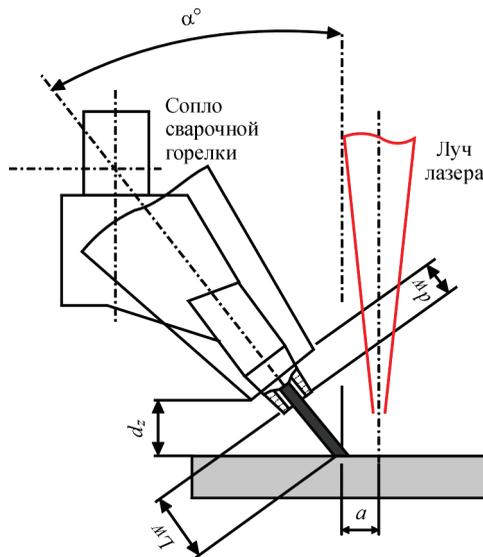


Рис. 2. Пространственное положение системы «лазерный луч – сварочная горелка MAG – свариваемый элемент», луч лазера перпендикулярный материалу:  $a$  — расстояние от конца проволоки до зоны фокусировки лазерного луча,  $\alpha$  — угол наклона сварочной горелки MAG относительно оси лазерного луча;  $L_w$  — вылет электрода,  $d_z$  — расстояние от газового сопла до элемента,  $d_w$  — выдвижение контактного наконечника из газового сопла

(обозначение L — A) и электрической дугой как ведущим источником тепла (обозначение A — L). Замеры подтвердили, что независимо от направления сварки, глубина проплавления сопоставима для отдельных диаметров примененных световодов, а с увеличением диаметра световода уменьшается глубина проплавления и увеличивается ширина в нижней части шва (рис. 1).

С точки зрения максимизации глубины проплавления наиболее подходящим решением кажется использование световода с наименьшим диаметром. Однако из-за стабильности процесса сварки ГЛДСПЭ (стабильность газодинамического канала, сформированного в результате воздействия лазерного луча) и для обеспечения ширины сварного шва в области его нижней части на уров-

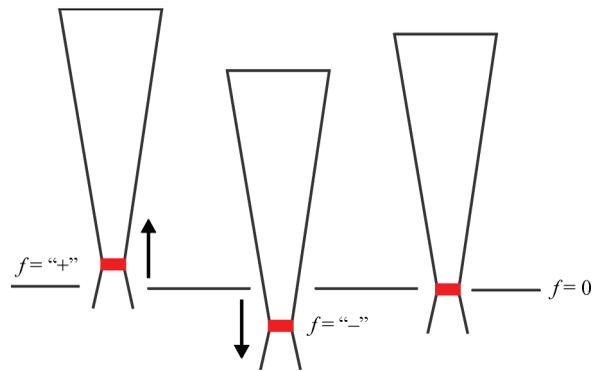


Рис. 4. Расположение фокуса лазерного луча относительно поверхности образца ( $f=0$  — положение фокуса на поверхности листа)

не свыше 1 мм рекомендуется выбирать световод с большим диаметром. В дальнейшем использовали световод диаметром 400 мкм и направление сварки A — L.

Важной группой параметров является взаимное пространственное положение системы «лазерный луч – сварочная горелка MAG – свариваемый элемент» (рис. 2).

Наиболее выгодной для автоматической сварки MIG/MAG является установка держателя перпендикулярно свариваемому материалу (угол  $\alpha = 0^\circ$ ). В процессе гибридной сварки лазерный луч в гораздо большей степени чем сварочная дуга отвечает за полученную глубину проплавления и поэтому он устанавливается перпендикулярно свариваемому материалу.

Для технологической головки, использованной в исследовании, были выбраны угол наклона держателя горелки MAG  $\alpha = 25^\circ$  и расстояние от конца проволоки до зоны фокусировки лазерного луча, обеспечивающие безопасный (без столкновений с лазерным лучом) процесс сварки:  $a \leq 2$  мм. Увеличение расстояния  $a$  до около 4 мм не оказывает существенного влияния на процесс. Полученная форма сварного шва сопоставима (рис. 3, а, б). Дальнейшее увеличение рассто-

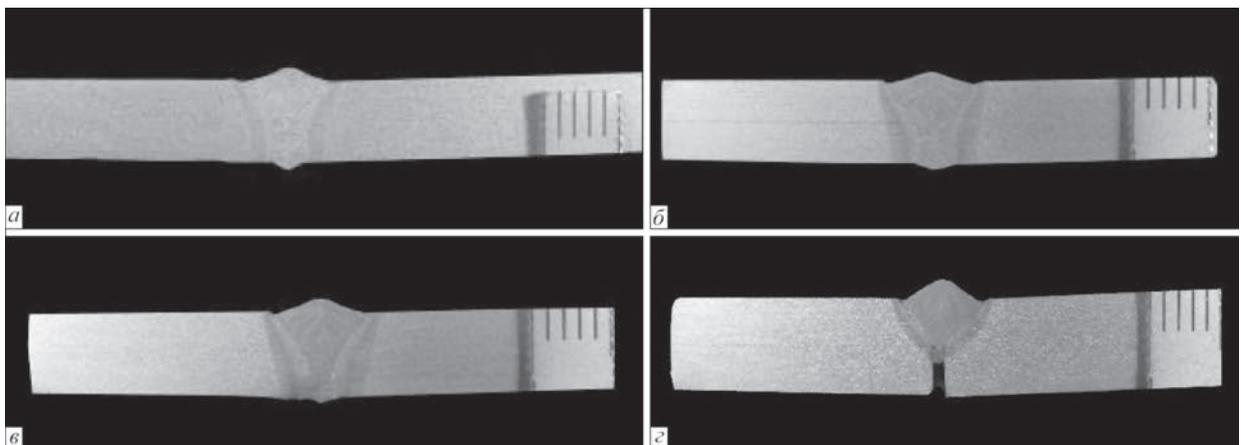


Рис. 3. Примерные макроструктуры шва, выполненного с разным расстоянием конца проволоки от зоны воздействия лазерного луча: а —  $a = 2$  мм, б — 4, в — 6, г — 8

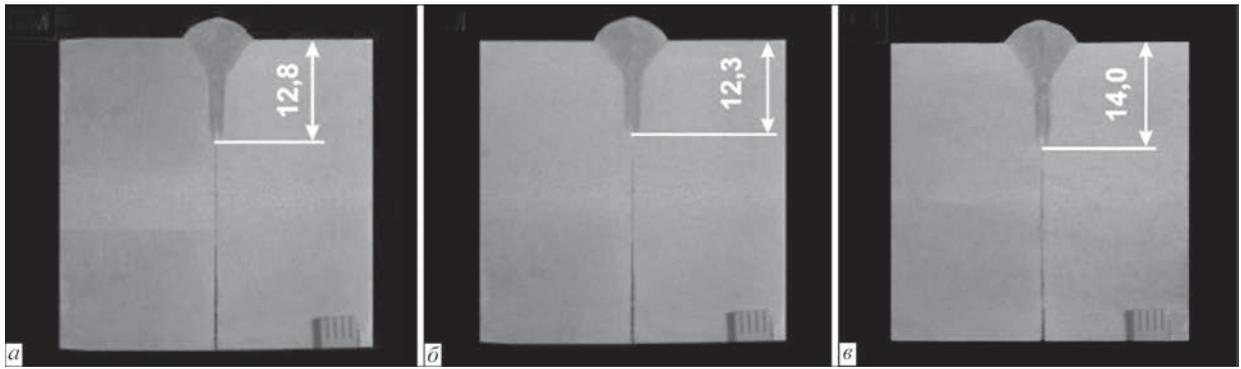


Рис. 5. Макроструктура стыковых соединений образцов толщиной 40 мм, выполненных при разном положении фокуса лазерного луча относительно поверхности свариваемого материала (мощность лазерного излучения  $P_{\text{л}} = 11$  кВт, скорость сварки  $v_{\text{св}} = 0,7$  м/мин, скорость подачи проволоки  $v_{\text{пр}} = 11$  м/мин): а —  $f = 0$  мм; б —  $-5$  мм; в —  $-10$  мм

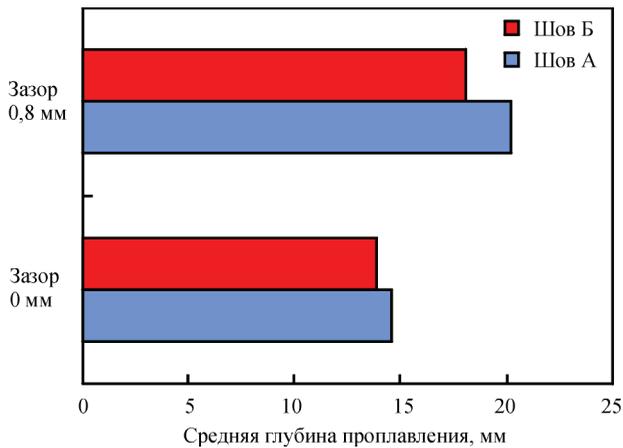


Рис. 6. Средние значения глубины проплавления стыковых соединений образцов толщиной 40 мм, выполненных с разным значением зазора  $g$  (двусторонняя сварка, первый шов — А, второй — Б)

яния вызывает уменьшение объема сварного шва (рис. 3, в) и в крайнем случае заметное падение глубины проплавления (рис. 3, з).

Отдельным вопросом является расположение фокуса лазерного луча относительно свариваемого материала (рис. 4). Технологические испытания ГЛДСПЭ проводились на образцах толщиной 40 мм с различной настройкой положения фокальной точки лазерного луча:  $f = 0$ ;  $-5$  и  $-10$  мм (рис. 4).

Глубина проплавления существенно не изменялась, составляла от 12,3 до 14 мм (рис. 5). Исходя из этого, рекомендовано установить в дальней-

шем положение фокусировки лазерного луча на поверхности свариваемого материала.

Затем проведено исследование зависимости глубины проплавления и геометрических размеров сварных швов от мощности лазерного луча в процессе ГЛДСПЭ. В зависимости от мощности лазерного луча в диапазоне 6...12 кВт глубина проплавления составляла 12,5...18,5 мм. Существенное влияние на глубину проплавления оказывает также зазор соединяемых элементов, что было подтверждено испытаниями при зазоре 0 и 0,8 мм (рис. 6).

Технологические испытания сварки стыковых соединений толщиной 8, 12 и 20 мм после лазерной резки (шероховатость поверхности соответственно  $\leq 11,3$ ;  $\leq 14,2$ ;  $\leq 70,0$  мкм) показали, что шероховатость поверхности свариваемых кромок до  $R_z = 70,0$  мкм не вызывает нарушения стабильности процесса ГЛДСПЭ. В случае плазменно-дуговой резки на установке YUN-3000M, с применением смеси Ar-H<sub>2</sub> в качестве плазмообразующего газа, шероховатость ниже 70,0 мкм и поверхность также пригодна для сварки ГЛДСПЭ.

Характерный для плазменной резки скос кромок может вызвать осевое смещение отдельных сварных швов в двустороннем соединении. Измеряли скос кромок образцов толщиной 25 мм и длиной 600 мм после производственной плазменной резки у промышленного партнера. Результа-

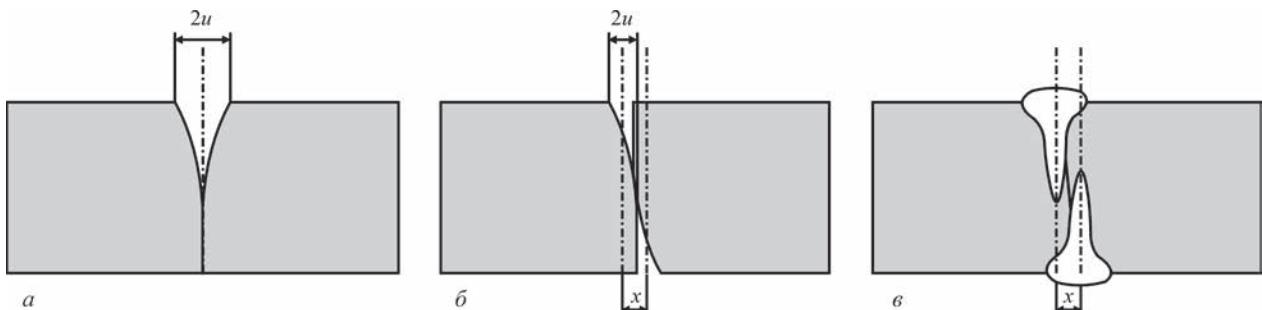


Рис. 7. Различные способы сочетания деталей, подготовленных к сварке, после плазменной резки: а — суммирование скоса на одной стороне стыка; б — смещение  $x$  оси отдельных сварных швов в двустороннем соединении; в — визуализация отсутствия проплавления, возникающего в результате сочетания деталей со скосом

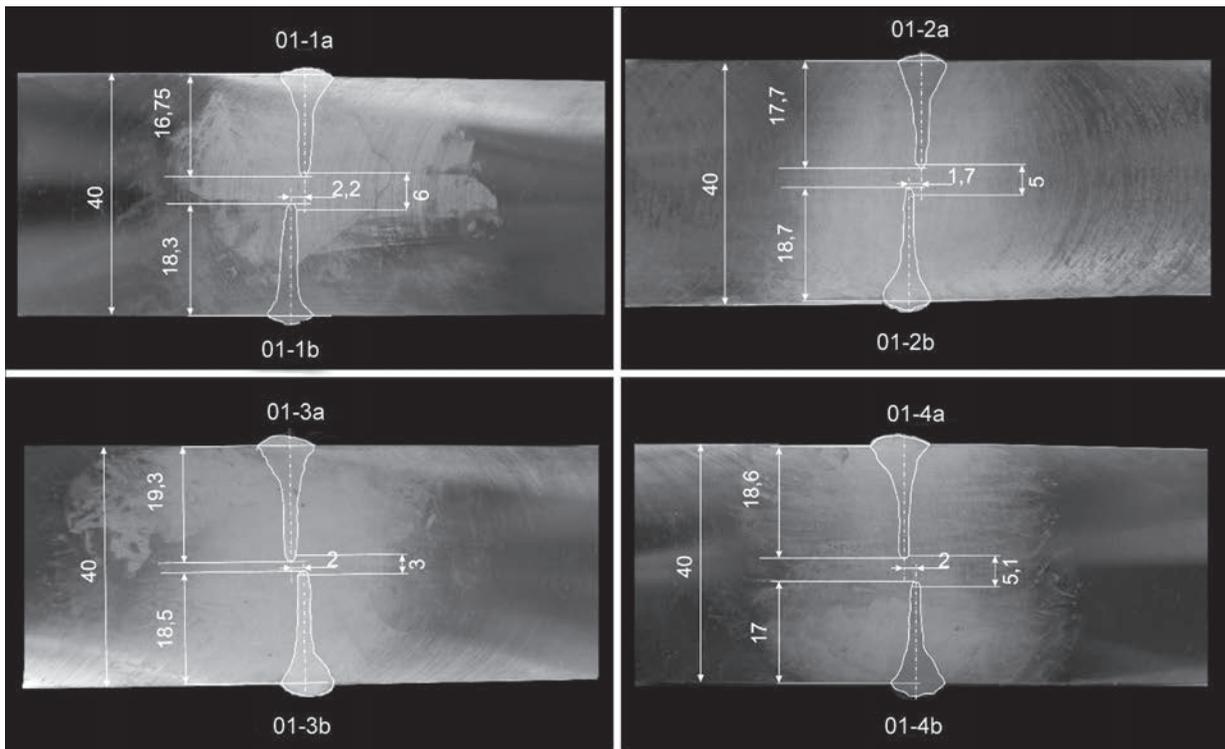


Рис. 8. Расположение и размеры швов двустороннего гибридного соединения листов толщиной 40 мм с подготовкой кромок после производственной плазменной резки и шлифовки

ты измерений показали, что скос кромок является относительно большим и при неблагоприятной комбинации листов для сварки, когда скос складывается, на поверхности листов создается зазор шириной более 2 мм. По мере увеличения толщины листа скос становится больше.

Появившийся скос приводит к тому, что комбинацию деталей в стыковом соединении можно по-

лучить двумя способами (рис. 7). В первом случае скос суммируется на одной стороне стыка деталей, вызывая увеличение зазора. Во втором случае скосы расположены на противоположных сторонах, что позволяет составить детали с меньшим зазором. Однако существует риск осевого смещения отдельных сварных швов в двухстороннем сварном шве. В этом случае возможно недостаточ-

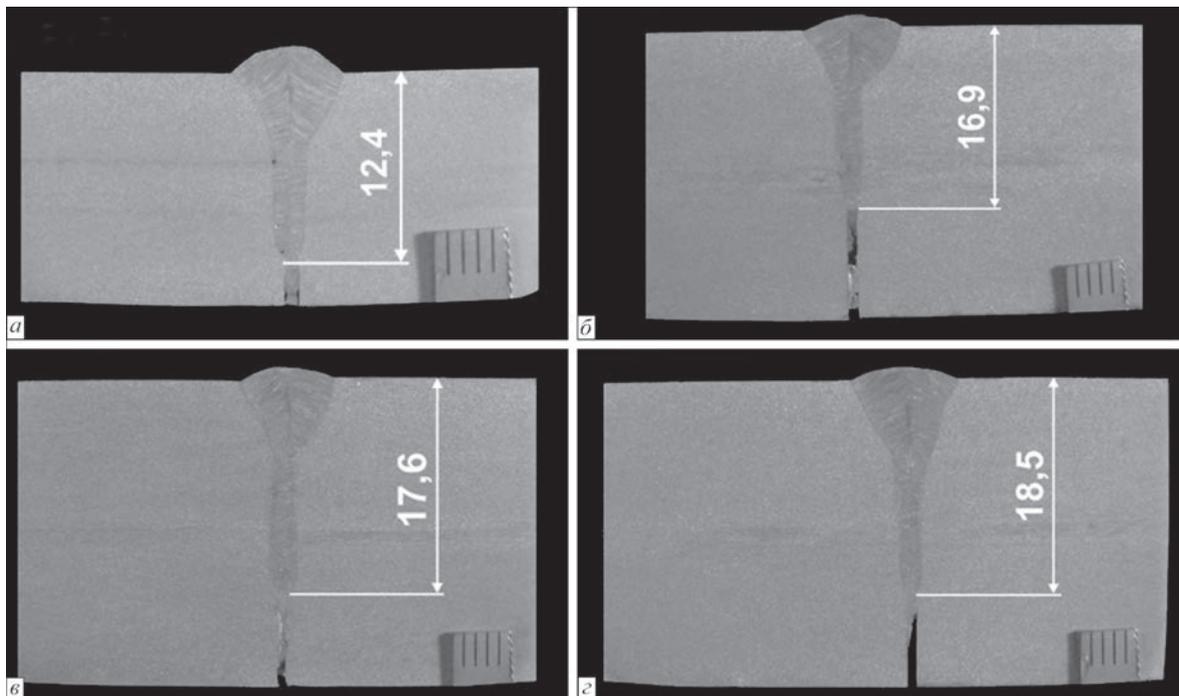


Рис. 9. Макроструктура швов, выполненных гибридной сваркой лазерным лучом мощностью 6...12 кВт: а —  $P = 6$  кВт; б — 8; в — 10; г — 12

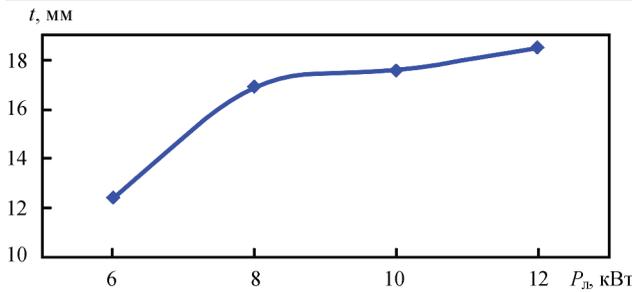


Рис. 10. Зависимость глубины проплавления  $t$  от мощности лазерного луча  $P_l$  при ГЛДСПЭ

ное проплавление в центральной части стыка, несмотря на обеспечение соответствующей глубины проплавления отдельных сварных швов (рис. 7, в).

Приведенные выше соображения подтверждают результаты ГЛДСПЭ листов толщиной 40 мм после производственной плазменной резки на образцах, предоставленных промышленным партнером. В связи с тем, что при стыковке листов в соответствии с рис. 7, а, зазор  $2u$  составлял более 3 мм, была предпринята попытка составить листы для сварки в соответствии со вторым способом (рис. 7, б), чтобы получить наименьший возможный зазор. После сварки были изготовлены металлографические образцы в четырех выбранных местах по длине сварного соединения. Макрошлифы полученных соединений показаны на рис. 8.

Средняя глубина проплавления составляла около 18 мм, что не позволяло выполнить двустороннее сварное соединение толщиной 40 мм с

полным проплавлением. На металлографических шлифах наблюдалось смещение осей отдельных валиков в результате использования плазменной резки в качестве способа подготовки стыка. Из-за необходимости поддерживать соосность отдельных сварных валиков в двустороннем сварном шве, необходимо обеспечить метод подготовки кромок, который обеспечит боковую кромку, перпендикулярную поверхности листа. Для материалов толщиной до 15 мм достаточно лазерной резки. Для более толстых материалов может потребоваться механическая обработка кромок.

Для определения влияния мощности лазерного луча в процессе ГЛДСПЭ на глубину проплавления и форму швов проведено сварку листов толщиной 40 мм с поверхностью кромок после фрезерования, с зазором 0,8...1,0 мм, изменяя мощность лазерного излучения от 6 до 12 кВт (рис. 9–11).

С увеличением мощности лазерного луча глубина проплавления увеличивается, однако не по линейной зависимости. Изменение мощности лазерного луча с 6 до 8 кВт приводит к увеличению глубины проплавления примерно на 4,5 мм (рис. 10). При дальнейшем увеличении мощности на 2 кВт проплавление выше на 0,7 мм. При мощности лазерного луча 12 кВт глубина проплавления составила 18,5 мм. При увеличении мощности лазерного луча на 50 %, с 8 до 12 кВт, глубина проплавления увеличилась на 1,6 мм, т. е. только на 9 %.

На основании этих результатов определены режимы гибридной сварки лазер + MAG в нижнем

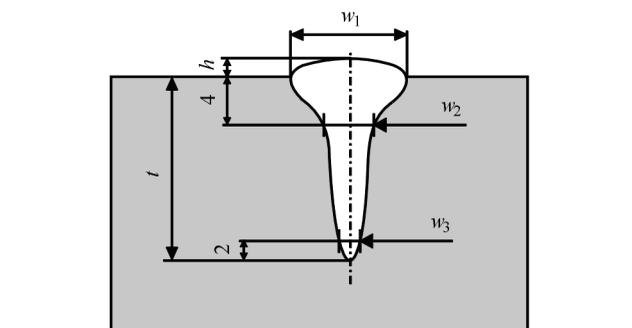
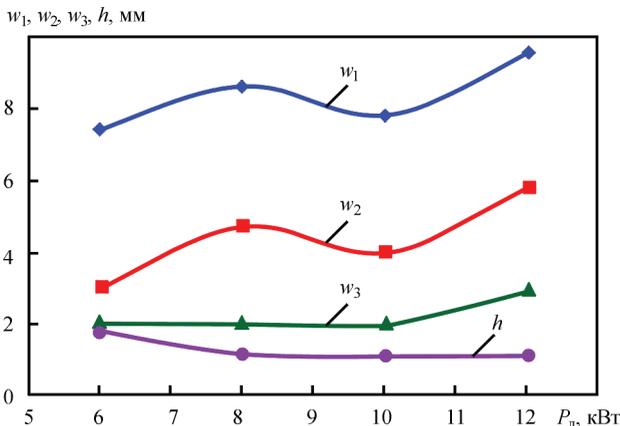


Рис. 11. Зависимость размеров шва от мощности лазерного луча при ГЛДСПЭ

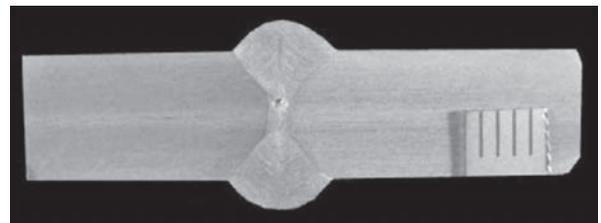


Рис. 12. Макроструктура двустороннего сварного соединения толщиной 8 мм ( $P_l = 5,0$  кВт,  $v_{cb} = 1,2$  м/мин,  $v_{пп} = 8,4$  м/мин, ток дуги  $I_d = 225$  А, напряжение дуги  $U_d = 21$  В, погонная энергия сварки  $Q = 3,9$  кДж/см)

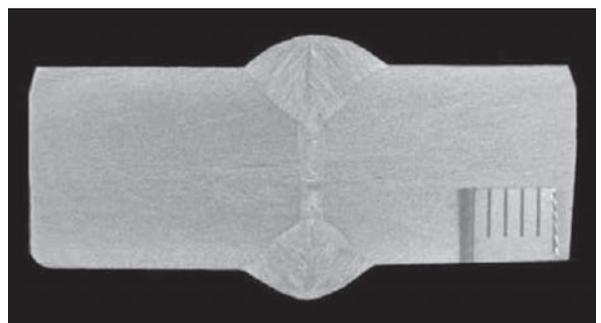


Рис. 13. Макроструктура сварного соединения толщиной 12 мм ( $P_l = 5,5$  кВт,  $v_{cb} = 1,2$  м/мин,  $v_{пп} = 8,6$  м/мин, ток дуги  $I_d = 250$  А,  $U_d = 28$  В,  $Q = 6,3$  кДж/см)

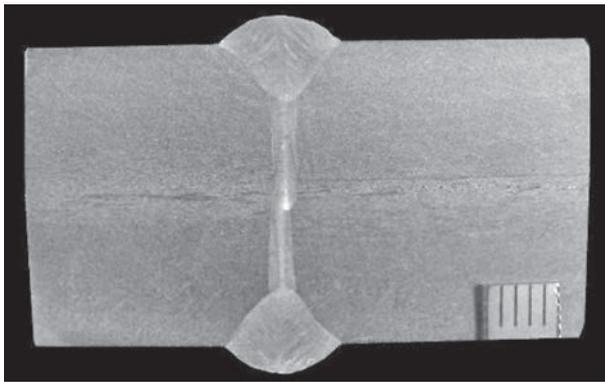


Рис. 14. Макроструктура сварного соединения толщиной 20 мм ( $P_{л} = 6,5$  кВт,  $v_{св} = 1,0$  м/мин,  $v_{пп} = 8,5$  м/мин,  $I_{д} = 235$  А,  $U_{д} = 27$  В,  $Q = 7,7$  кДж/см)

положении двусторонних стыковых соединений сталей X2CrNi18-9 и X2CrNiMoN21-5-1 толщиной 8, 12 и 20 мм (рис. 12–14), стыковых соединений этих листов с подваркой методом MAG и

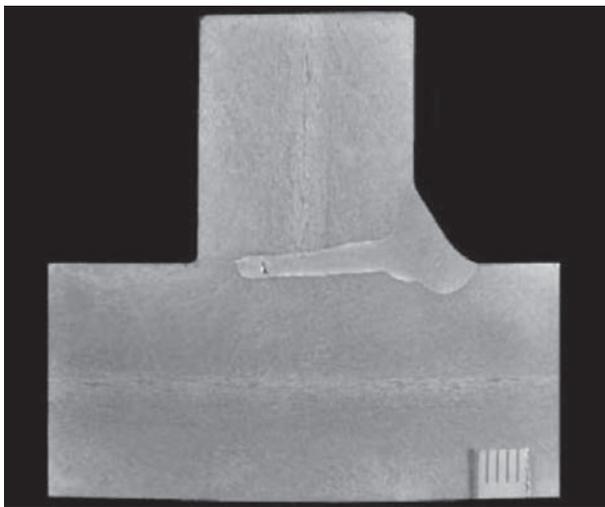


Рис. 15. Макроструктура одностороннего таврового соединения толщиной 20 мм, с частичным проплавлением ( $P_{л} = 10,0$  кВт,  $v_{св} = 0,7$  м/мин,  $v_{пп} = 8,5$  м/мин,  $I_{д} = 227$  А,  $U_{д} = 29$  В,  $Q = 14,2$  кДж/см)

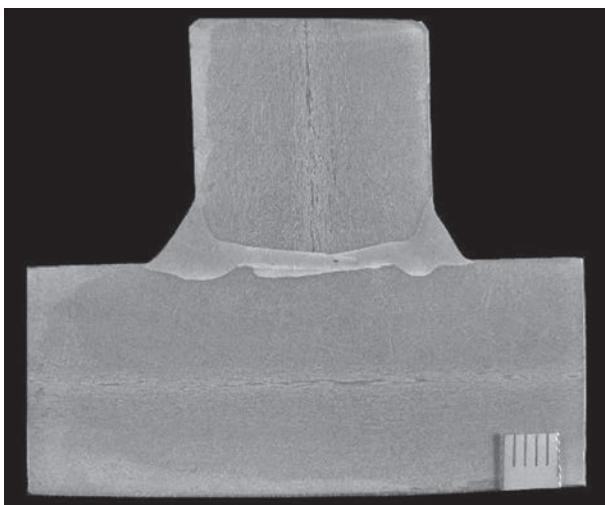


Рис. 16. Макроструктура двустороннего таврового соединения толщиной 20 мм ( $P_{л} = 10,0$  кВт,  $v_{св} = 1,3$  м/мин,  $v_{пп} = 8,5$  м/мин,  $I_{д} = 241$  А,  $U_{д} = 28$  В,  $Q = 7,7$  кДж/см)



Рис. 17. Обратная сторона таврового соединения листов толщиной 20 мм — выступы (хампы)

ГЛДСПЭ, а также тавровых односторонних и двусторонних соединений (рис. 15, 16).

Не разрушающие и разрушающие испытания двустороннего стыкового соединения плит из стали X2CrNi18-9 толщиной 12+12 мм (см. рис. 13) показали, что они удовлетворяют требованиям стандарта ISO 15614-14 по аттестации процедуры гибридной сварки.

**Дефекты швов ГЛДСПЭ.** Специфическими дефектами односторонних сварных швов, выполненных гибридной сваркой, являются нестабильное формирование обратной стороны (корня) сварных швов и пористость (рис. 17, 18).

При односторонней сварке гибридных стыковых соединений типичными дефектами являются непровар в корне сварного шва и превышение проплава. В начале имеется участок шва без полного проплавления, затем короткий участок с полным проплавлением, после которого следует про-



Рис. 18. Продольное сечение стыкового соединения толщиной 8 мм — выступы и пористость



Рис. 19. Вид одностороннего сварного соединения толщиной 20 мм ( $P_{л} = 11,0$  кВт,  $v_{св} = 0,4$  м/мин,  $v_{пп} = 8,5$  м/мин,  $I_{д} = 222$  А,  $U_{д} = 31$  В,  $Q = 21,5$  кДж/см): а — лицевая сторона — незаполненная разделка кромок и прожог после около 110 мм, б — корневая сторона — непровар, превышение проплава и проплавление медной трубки подвода формирующего газа

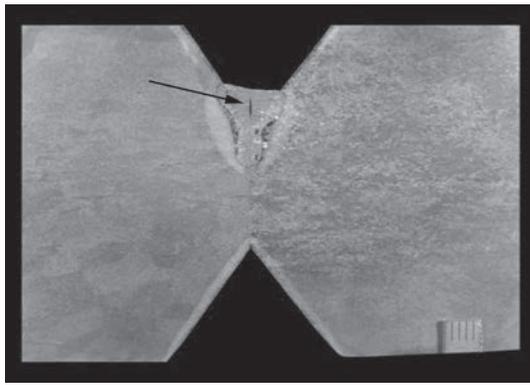


Рис. 20. Макроструктура корневого шва стыкового соединения стали X6Cr13 с трещиной (указана стрелкой)

жог и утечка жидкого металла сварочной ванны (рис. 19).

К дефектам сварных швов высоколегированных сталей, выполненных гибридной сваркой, принадлежат также горячие трещины. Склонность к образованию горячих трещин обнаружена в случае выполнения корневого шва стыкового соединения стали X6Cr13 толщиной 50 мм с притуплением 15 мм (рис. 20).

#### Выводы

1. Гибридная сварка лазер + МАG позволяет выполнять с полным проплавлением в нижнем положении двусторонние стыковые соединения стали X2CrNi18-9 и X2CrNiMoN21-5-1 толщиной 8, 12 мм (односторонняя) и 20 мм (двусторонняя), а

также стыковые соединения с подваркой методом МАG и ГЛДСПЭ.

2. Гибридная сварка позволяет выполнять в нижнем положении тавровые соединения листов толщиной 8, 12 и 20 мм со стыковым швом с частичным проплавлением, часто заменяющие тавровые соединения с угловым швом, а также тавровые соединения со стыковым швом листов толщиной до 20 мм.

3. К специфическим дефектам сварных швов высоколегированных нержавеющей сталей, выполненных гибридной сваркой, принадлежат: нестабильное формирование корня сварных швов, пористость и горячие трещины.

#### Литература/References

1. Atabaki Mazar M., Ma J., Yang G., Kovacevic R. (2014) Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials and Design*, 64, December, 573–587.
2. Brian M. Victor (2011) Hybrid laser arc welding. *Edison Welding Institute, ASM Handbook, 6A, Welding Fundamentals and Processes*, 321-328
3. Krivtsov I.V., Krikent I.V., Demchenko V.F., Reisinger U., Zabirow A.F., Mokrov O.A. (2015) Interaction of CO<sub>2</sub>-laser radiation beam with electric arc plasma in hybrid (laser + TIG) welding. *The Paton Welding Journal*, 3-4, 6-15.
4. Lembeck H. (2010) Laser hybrid welding of thick sheet metals with disk lasers in shipbuilding industry, *International Laser Technology Congress AKL*.
5. Turichin G., Velichko O., Kuznetsov A. et al. (2014) Mobile Hybrid system for pipeline welding on the base of 20 kW fiber laser. *8th International Conference on Photonic Technologies LANE*, pp. 1-4.

## ОСОБЛИВОСТІ ГІБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

Турик Е., Банасік М., Стано С., Урбаньчик М.

Дослідницька мережа Лукасевич — Інститут зварювання, м. Глівіце, Польща.  
44100, м. Глівіце, вул. Бл. Чеслава 16-18, Польща

Застосування гібридного лазерно-дугового зварювання лазер + МАG для з'єднання елементів великих конструкцій з нержавіючої сталі є відносно новою проблемою. В роботі обговорено питання технології гібридного зварювання аустенітної сталі X2CrNi18-9 і аустенітно-феритної X2CrNiMoN21-5-1 з використанням дискового лазера потужністю 12 кВт. Визначено технологічні умови гібридного зварювання з повним проплавленням стикових з'єднань сталі завтовшки 8, 12 і 20 мм, а також таврових з'єднань зі стиковим швом з частковим проплавленням. Зазначено типові дефекти зварних швів високолегованих нержавіючих сталей, виконаних гібридним зварюванням. Бібліогр. 5, рис. 20.

*Ключові слова:* гібридне зварювання, лазер + дуга, активний газ, нержавіючі сталі, параметри дуги і променя, розташування джерел, типові дефекти зварювання

## PECULIARITIES OF HYBRID LASER-ARC WELDING OF STAINLESS STEEL

Turyk E., Banasik M., Stano S., Urbanchik M.

The use of hybrid laser-arc welding laser + MAG for joining elements of large structures of stainless steel is a relatively new problem. The paper discusses the issues of technology of hybrid welding of austenitic steel X2CrNi18-9 and austenitic-ferritic steel X2CrNiMoN21-5-1 using a disc laser of 12 kW capacity. The technological conditions of hybrid welding with a full penetration of butt joints of steel with a thickness of 8, 12 and 20 mm, as well as T-joints with a butt weld with a partial penetration were determined. The typical defects in welds of high alloy stainless steels, produced by hybrid welding, were indicated. 5 Ref., 20 Fig.

*Keywords:* hybrid welding, laser + arc, active gas, stainless steels, arc and beam parameters, location of sources, typical welding defects

Поступила в редакцію 27.06.2019

## ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $\gamma$ -TiAl С ЖАРОПРОЧНЫМ НИКЕЛЕВЫМ СПЛАВОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОПРОСЛОЕК Al/Ni

Фальченко Ю.В., Петрушинец Л.В., Мельниченко Т.В., Устинов А.И., Федорчук В.Е.

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

Изучено влияние структурных характеристик и химического состава нанослойных промежуточных прослоек на основе системы Al-Ni на формирование соединений сплава на основе  $\gamma$ -TiAl и жаропрочного никелевого сплава при диффузионной сварке в вакууме. Показано, что применение нанослойных плакированных промежуточных прослоек обеспечивает формирование диффузионной зоны с монотонным изменением содержания компонентов, фазовый состав и микромеханические характеристики которой определяются химическим составом промежуточной прослойки, а также снижает вероятность формирования хрупких фаз в стыке. Библиогр. 18, табл. 6, рис. 7.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка в вакууме, интерметаллиды, нанослойные прослойки

Алюминиды титана являются перспективными материалами для изготовления деталей авиационных двигателей, обшивки и сотовых конструкций сверхзвуковых летательных аппаратов. Сплавы на основе  $\gamma$ -TiAl могут использоваться для получения деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, работающих при 700...1000 °С [1]. Из литых алюминидов титана изготавливают уплотнители кожуха, воздушные фильтры, детали сопла, лопатки компрессора, элементы конструкции камеры сгорания, клапаны автомобильных двигателей и т. д. [2].

С развитием аэрокосмических технологий и разработкой новых конструкционных жаропрочных сплавов возникает необходимость соединения пар разнородных материалов, например, интерметаллидных сплавов  $\gamma$ -TiAl и жаропрочных сплавов на основе никеля. Сочетание разнородных жаропрочных материалов в конструкции расширяет возможности ее функционального применения.

Существующие технологии сварки плавлением данных материалов не позволяют получить высококачественные сварные соединения из-за ликвационных явлений, структурных и фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния, что приводит к появлению горячих трещин в соединении [3, 4]. Диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) является наиболее перспективным методом соединения сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl с жаропрочными сплавами на никелевой основе [5–7]. Однако при данном методе сварки образование соединения сопровождается формированием диффузионной зоны со сложным фазовым составом, включающим хрупкие фазы, которые могут негативно влиять на механические свойства соединения. С другой стороны, низкая пластичность  $\gamma$ -TiAl за-

трудняет установление физического контакта при ДСВ. Для активации свариваемых поверхностей при диффузионной сварке разнородных материалов и интенсификации диффузионных процессов обычно применяют промежуточные пластичные прослойки [8]. Однако применение промежуточных прослоек, полученных прокаткой и имеющих толщину 50...300 мкм, приводит к формированию диффузионной зоны с химическим составом и механическими свойствами, резко отличающимися от свойств свариваемых материалов [9]. При использовании такого подхода для интенсификации диффузионных процессов в зоне соединения применяют предварительное наводороживание промежуточных прослоек. Однако для предотвращения выделения водорода на стадии нагрева сварку проводят с применением высокоинтенсивных источников нагрева, способных обеспечить скорость повышения температуры до 1200 °С/мин [6].

Для активации диффузионных процессов при формировании соединения перспективно применение покрытий или промежуточных фольг с нано- и субмикроструктурной структурой, характеризующихся сверхпластичностью, что позволяет локализовать пластическую деформацию свариваемых поверхностей непосредственно в стыке. Так, авторы работы [6] проводили лазерную модификацию поверхности алюминида титана, что в сочетании с нанесением слоя TiAl на поверхность никелевого сплава обеспечило получение бездефектного соединения. Авторы работ [7, 10, 11] показали, что применение при ДСВ разнородных и трудно деформируемых материалов нанослойных прослоек в виде фольги или покрытия позволяет активировать свариваемые поверхности, повысить интенсивность диффузионных

процессов и снизить термомеханическое воздействие на свариваемые материалы. С этой точки зрения перспективным является применение промежуточной прослойки в виде нанослойной реакционной фольги, полученной методом электронно-лучевого осаждения, которые характеризуются интенсивным прохождением фазовых превращений и низкотемпературной пластической деформацией при термомеханическом нагружении [12, 13]. Выбор химического состава и структурных характеристик промежуточной прослойки определяется химическим составом свариваемых материалов и рабочей температурой эксплуатации изделия.

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования соединений сплава на основе  $\gamma$ -TiAl и никелевого жаропрочного сплава с содержанием хрома > 20 мас. % и с объемной долей  $\gamma'$ -фазы < 10 об. % способом ДСВ через нанослойные промежуточные прослойки.

**Методика исследований.** Химический состав сплава на основе  $\gamma$ -TiAl и жаропрочного никелевого сплава приведен в табл. 1.

Сплав на основе  $\gamma$ -TiAl получен методом электронно-лучевого переплава с последующим изостатическим прессованием под давлением 120...150 МПа при температуре 1260 °С на протяжении 4 ч, что обеспечивало залечивание дефектов литья. Полученный материал подвергался гомогенизирующему отжигу при 1100 °С продолжительностью 6...8 ч, прокатке с малой скоростью при температуре 1200 °С и гомогенизирующей термообработке при 1100 °С продолжительностью 6...8 ч. Полученный сплав на основе интерметаллида  $\gamma$ -TiAl характеризуется ламельной двухфазной структурой  $\gamma/\alpha_2$ .

Жаропрочный никелевый сплав с объемной долей  $\gamma'$ -фазы < 10 об. % относится к группе удовлетворительно свариваемых сплавов и характеризуется высокой жаропрочностью, низкой теплопроводностью, высокой склонностью к ме-

ханическому упрочнению (наклепу) в процессе механической обработки [14].

Подготовка образцов под сварку состояла в их порезке на электроэрозионном станке, шлифовке поверхностей и обезжиривании. Образцы сваривали встык на установке У-394М [15]. Диффузионную сварку интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl с жаропрочным никелевым сплавом проводили в вакууме  $P_{\text{св}} = 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па при температуре  $T_{\text{св}} = 1050$  °С, давлении  $P_{\text{св}} = 20$  МПа, времени сварки  $t_{\text{св}} = 20$  мин.

Промежуточные прослойки на основе системы Al-Ni в виде нанослойной фольги с однородным распределением компонентов и плакированной слоями металлов (рис. 1, а, б) толщиной 20...35 мкм, периодом чередования слоев 60...200 нм получали методом послойного электронно-лучевого осаждения паровых фаз алюминия и никеля, подробно описанным в работе [16]. Структура и химический состав промежуточных прослоек представлен в табл. 2. При нагреве многослойной фольги в условиях одноосного растяжения она испытывает низкотемпературную интенсивную пластическую деформацию, подобную сверхпластической деформации, что обусловлено фазовыми и структурными превращениями, проходящими в ней при нагреве [13] (рис. 1, в, г).

Анализ микроструктуры сварных соединений и нанослойных фольг проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа CamScan-4, оснащенного системой энергодисперсионного анализа EDX INCA 200 для определения химического состава материала на плоских образцах. Образцы для исследования в виде шлифов поперечного сечения фольг и сварных соединений готовили по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers.

Оценку микротвердости и коэффициента пластичности сварных соединений проводили путем определения микромеханических характеристик на установке «Микрон-гамма» методом автоматическо-

**Таблица 1.** Химический состав сплавов

Сплав	Химический состав, мас. %							
	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
Ni-сплав ЭИ437Б	0,92	0,46	2,65	21,01	0,25	0,83	73,88	–
Сплав $\gamma$ -TiAl	32,65	–	59,24	3,9	–	–	–	4,21

**Таблица 2.** Характеристика промежуточной прослойки

Промежуточная прослойка	Химический состав реакционной прослойки Al/Ni, мас. %		Толщина реакционной и плакирующих прослоек, мкм		
	Al	Ni	Реакционная прослойка	Cu	Ni
Al/Ni (AlNi)	34,82	65,18	30	–	–
Al/Ni (AlNi <sub>3</sub> )	13,32	86,68	34	–	–
Ni-Al/Ni-Ni	32,56	67,44	17	–	3+3
Cu-Al/Ni-Ni	12,03	87,97	22	2	1

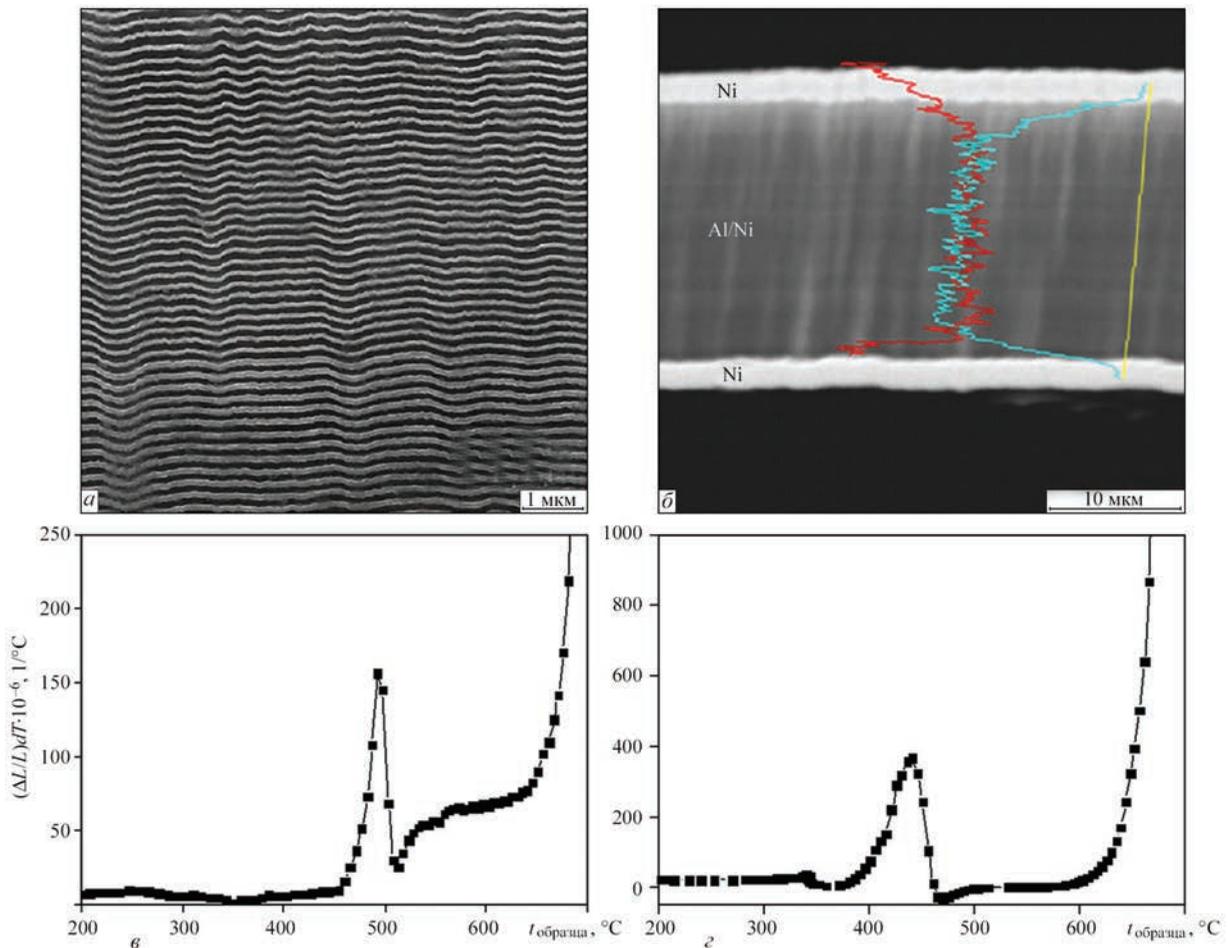


Рис. 1. Микроструктура и скорость деформации при нагреве в условиях одноосного растяжения нанослойной фольги с однородным распределением компонентов (а, в) и плакированной (б, г), соответственно

го индентирования с использованием алмазной пирамиды Берковича ( $\alpha = 65^\circ$ ) при нагрузке 0,4 Н [17].

**Результаты исследований.**

Сварка интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl с жаропрочным никелевым сплавом. При ДСВ алюминид титана со сплавом ЭИ437Б без промежуточных прослоек в соединении формируется диффузионная зона толщиной приблизительно 35 мкм, состоящая из интерметаллидных слоев на основе системы Ti-Ni-Al разного состава (рис. 2, табл. 3), преимущественно состоящих из фаз

$\tau_3$ -Al<sub>3</sub>NiTi<sub>2</sub> и  $\tau_4$ -AlNi<sub>2</sub>Ti [18]. Формирование интерметаллидных слоев приводит к повышению микротвердости диффузионной зоны до 14 ГПа.

Формирование интерметаллидов с механическими характеристиками, значительно отличающимися от свариваемых сплавов, обуславливает возникновение напряжений в соединении, что приводит к появлению трещин при охлаждении (рис. 2) в зонах, примыкающих к никелевому сплаву, в которых вследствие диффузии хрома формируется хрупкая фаза CrNi<sub>2</sub> (рис. 2, б).

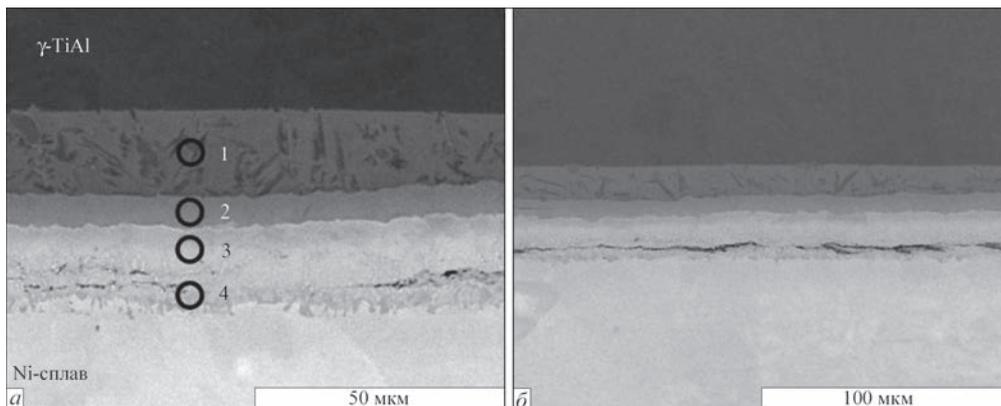


Рис. 2. Микроструктура соединения  $\gamma$ -TiAl–никелевый сплав, полученного диффузионной сваркой без промежуточной прослойки (1–4 — область анализа)

**Таблица 3.** Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 2, а

Область анализа	Химический состав зон анализа, мас. %						Фаза
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	
1	22,92	65,48	4,3	–	3,78	3,52	–
2	24,45	39,41	4,4	0,48	28,15	3,11	$\tau_3$
3	12,77	13,36	7,06	–	66,8	–	$\tau_4$
4	7,7	5,83	35,66	–	50,82	–	–

Можно предположить, что пластичная промежуточная нанослойная прослойка будет не только обеспечивать физический контакт свариваемых поверхностей, но и влиять на характер диффузионных процессов в соединении и формирование фазового состава диффузионной зоны. Для оценки такого влияния изучена роль нанослойных промежуточных прослоек на основе системы Al-Ni химического состава, соответствующего стехиометрии интерметаллидов AlNi и AlNi<sub>3</sub>, и плакированных прослоек на их основе: Ni-Al/Ni(AlNi)-Ni, Cu-Al/Ni(AlNi<sub>3</sub>)-Ni, при формировании соединений  $\gamma$ -TiAl с жаропрочным никелевым сплавом.

*Исследование влияния промежуточной прослойки Al/Ni на формирование соединения интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl и никелевого сплава.*

1. Прослойка состава AlNi.

Использование в качестве промежуточной прослойки нанослойной фольги состава AlNi не обеспечивает формирование соединения (рис. 3), что, по-видимому, является следствием высокой реакционной способности фольги и формирования в соединении хрупкого интерметаллидного слоя на основе соединения AlNi, наличие которого способствует появлению трещин в стыке при охлаждении.

2. Прослойка состава AlNi<sub>3</sub>.

Диффузионную сварку сплавов  $\gamma$ -TiAl и никелевого жаропрочного сплава проводили с использованием в качестве промежуточной прослойки нанослойной фольги системы Al-Ni, состав которой соответствует интерметаллиду AlNi<sub>3</sub>. Как

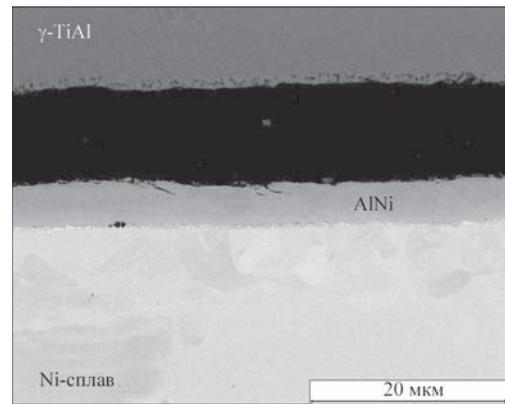


Рис. 3. Микроструктура соединения  $\gamma$ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной нанослойной прослойки состава AlNi

видно из анализа микроструктуры соединения (рис. 4, а), использование такой промежуточной прослойки обеспечивает активацию взаимной диффузии компонентов фольги и сплавов с формированием бездефектного соединения. С учетом того, что реакционная способность нанослойной фольги состава AlNi<sub>3</sub> на порядок ниже [19], чем состава AlNi, можно предположить, что характер фазовых превращений при нагреве нанослойной прослойки влияет на диффузионные процессы в соединении. В результате взаимной диффузии компонентов формируется диффузионная зона шириной приблизительно 50 мкм с монотонным изменением концентрации компонентов в ней (рис. 4, б, табл. 4). В результате реакционной диффузии компонентов сплавов и промежуточной прослойки со стороны  $\gamma$ -TiAl в соединении формируется прослойка тройной интерметаллидной фазы  $\tau_4$ , что приводит к повышению микротвердости материала в области стыка (рис. 4, в).

*Влияние плакированной промежуточной прослойки на основе системы Al-Ni на формирование соединения интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl и никелевого сплава.*

1. Прослойка Ni-Al/Ni -Ni.

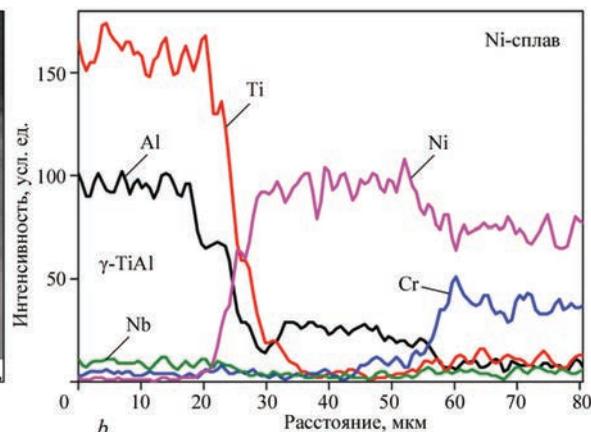
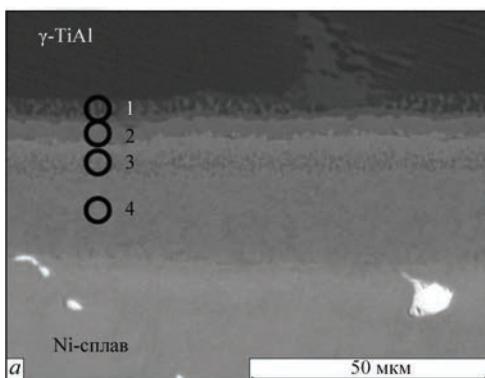


Рис. 4. Микроструктура (а) и распределение компонентов (б) в соединении  $\gamma$ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной нанослойной прослойки состава AlNi<sub>3</sub>

**Таблица 4.** Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 4, а

Область анализа	Химический состав зон соединения, мас. %					Фаза
	Al	Ti	Cr	Ni	Nb	
1	22,94	59,72	1,76	11,62	3,97	—
2	13,69	24,27	—	60,64	1,4	$\tau_4$
3	12,25	5,59	—	82,16	—	—
4	12,83	0,31	1,35	85,51	—	—

Отсутствие соединения при использовании промежуточной прослойки Al/Ni состава, соответствующего стехиометрии AlNi, дало основание предположить, что наличие плакирующих прослоек никеля на поверхностях нанослойной фольги позволит улучшить физический контакт свариваемых поверхностей благодаря химическому сродству никелевых прослоек к  $\gamma$ -TiAl и никелевому сплаву [12].

Диффузионную сварку  $\gamma$ -TiAl и никелевого сплава проводили через плакированную промежуточную прослойку Ni-Al/Ni-Ni, которая состоит из нанослойной фольги системы Al-Ni состава, соответствующего стехиометрии AlNi, и плакирующих слоев никеля (табл. 2). Как показали металлографические исследования сварных соединений, поры и трещины в стыке отсутствуют (рис. 5).

Использование при сварке плакированной нанослойной фольги обеспечивает формирование соединения и способствует активному протеканию диффузионных процессов в промежуточной прослойке. Взаимная диффузия компонентов сплава и фольги приводит к формированию в стыке диффузионной зоны шириной 45 мкм с монотонным изменением концентрации компонентов (рис. 5, б) и слоистой структурой. Со стороны  $\gamma$ -TiAl формируются слои интерметаллидных фаз на основе Ti-Ni-Al с разным соотношением компонентов (табл. 5). Наличие слоев никеля на поверхности промежуточной фольги с одной стороны способствует снижению диффузии хрома из никелевого сплава, о чем свидетельствует низ-

**Таблица 5.** Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 5, а

Область анализа	Химический состав зон соединения, мас. %				
	Al	Ti	Cr	Ni	Nb
1	24,94	40,39	3,52	28,05	3,11
2	13,77	24,07	0,40	60,67	1,10
3	21,78	0,75	1,06	76,41	—
4	6,20	3,01	24,56	66,23	—

кое содержание хрома в диффузионной зоне, а с другой стороны, обеспечивает формирование в центральной части диффузионной зоны интерметаллида, обогащенного никелем ( $Al_3Ni_5$ ) (табл. 5, область анализа 3), что способствует снижению микротвердости материала до 6,8 ГПа.

2. Прослойка Cu-Al/Ni-Ni.

Диффузионную сварку  $\gamma$ -TiAl и никелевого сплава проводили через плакированную промежуточную прослойку Cu-Al/Ni-Ni, которая состоит из нанослойной фольги системы Al-Ni, соответствующего стехиометрии AlNi<sub>3</sub> и плакирующих слоев меди и никеля (табл. 2). Промежуточную прослойку размещали таким образом, чтобы слой меди контактировал с  $\gamma$ -TiAl, а слой никеля — с никелевым сплавом. Такое размещение прослойки предопределяется химическим сродством компонентов плакирующих слоев и сплавов.

Микроструктура соединения показана на рис. 6, а. Диффузионное перемешивание компонентов сплавов обеспечивает формирование диффузионной зоны, состоящей из слоев с разным фазовым составом (рис. 6, б, табл. 6), в которой медь концентрируется в области, близкой к интерметаллиду титана, что является следствием химического сродства титана и меди и, вероятно, формированием низкотемпературной эвтектической составляющей, что улучшает физический контакт свариваемых поверхностей.

На рис. 7 приведены значения микротвердости и коэффициента пластичности свариваемых спла-

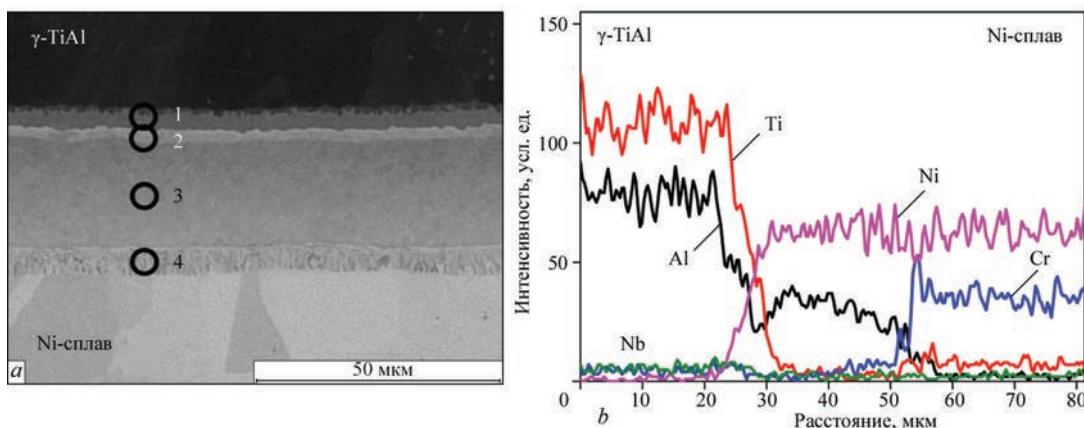


Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение компонентов (б) соединения  $\gamma$ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной плакированной прослойки Ni/Al-Ni-Ni

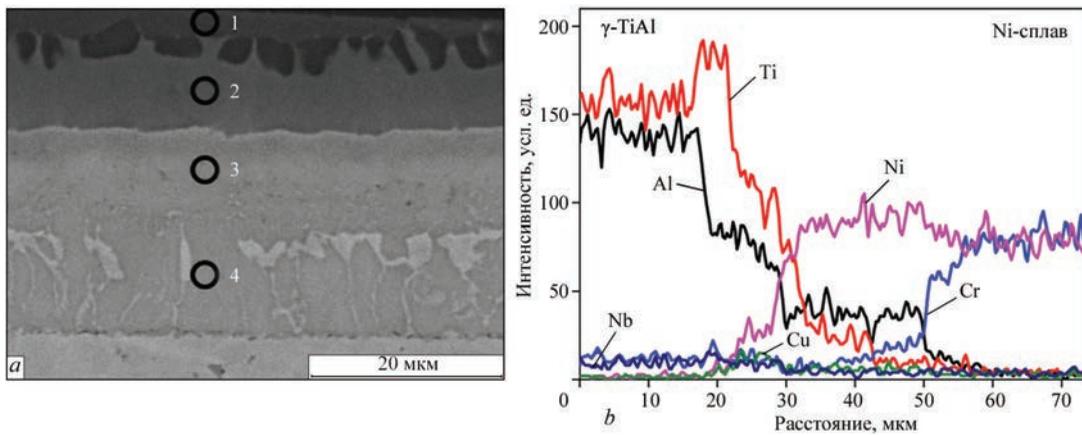


Рис. 6. Микроструктура (а) и распределение компонентов (б) соединения  $\gamma$ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной плакированной прослойки Cu-Al/Ni-Ni

Таблица 6. Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 6, а

Область анализа	Химический состав зон соединения, мас. %						
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Nb
1	22,74	62,65	6,24	—	1,63	3,07	3,66
2	25,38	39,19	4,70	—	16,48	11,32	2,94
3	15,34	10,45	2,37	0,92	67,40	3,51	—
4	16,14	4,69	4,92	1,96	72,30	—	—

что является следствием образования хрупких интерметаллидных фаз с высокой микротвердостью (до 14 ГПа) и фазы  $\text{CrNi}_2$ .

2. Применение при диффузионной сварке сплава  $\gamma$ -TiAl с никелевым жаропрочным сплавом плакированной нанослойной промежуточной прослойки на основе системы Al-Ni обеспечивает образование бездефектных соединений благодаря формированию диффузионной зоны с монотонным характером распределения компонентов, снижению ее микротвердости.

Список литературы

1. Банных О.А., Поварова К.Б., Браславская Г.С. и др. (1996) Механические свойства литых сплавов  $\gamma$ -TiAl. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1**, 11–14.
2. Полькин И.С., Колачев Б.А., Ильин А.А. (1997) Алюминиды титана и сплавы на их основе. *Технология легких сплавов*, **3**, 32–39.
3. Шоршоров М.Х., Ерохин А.А., Чернышова Т.А. (1973) *Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение.
4. Замков В.Н., Великоиваненко Е.А., Сабокарь В.К., Вржижевский Э.Л. (2001) Выбор температуры предварительного подогрева  $\gamma$ -алюминиды титана при ЭЛС. *Автоматическая сварка*, **11**, 20–23.
5. Peng He, Jun Wang, Tiesong Lin, Haixin Li. (2014) Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics and Ni-based superalloy using hydrogenated  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  interlayer. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 1882–1887.
6. Li Z.F., Wu G.Q., Huang Z., Ruan Z.J. (2004) Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*, **58**, 3470–3473.
7. Ramos A.S., Vieira M.T., Simoes S., Viana F., Vieira M.F. (2009) Joining of Superalloys to Intermetallics Using Nanolayers. *Advanced Materials Research*, **59**, 225–229.
8. Люшинский А.В. (2001) Критерии выбора промежуточных слоев при диффузионной сварке в вакууме разнородных материалов. *Сварочное производство*, **5**, 40–43.
9. Юштин А.Н., Замков В.Н., Сабокарь В.К., Чвертко П.Н., Петриченко И.К. (2001) Сварка давлением интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl. *Автоматическая сварка*, **1**, 33–37.
10. Ramos A.S., Vieira M.T., Simoes S., Viana F., Vieira M.F. (2010) Reaction-Assisted Diffusion Bonding of Advanced Materials. *Defect and Diffusion Forum*, **297–301**, 972–977.
11. Ustinov A.I., Falchenko Yu.V., Ishchenko A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **8**, 1043–1045.

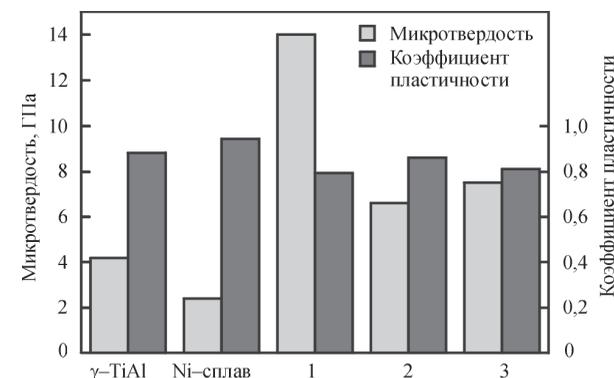


Рис. 7. Микротвердость и коэффициент пластичности сплава на основе  $\gamma$ -TiAl и никелевого сплава, а также их соединений, полученных диффузионной сваркой без промежуточной прослойки (1), с прослойкой Ni-Al/Ni-Ni (2) и Cu-Al/Ni-Ni (3) вов и диффузионной зоны соединений, полученных ДСВ без промежуточной прослойки и с плакированной промежуточной прослойкой разного состава. Видно, что применение плакированной нанослойной промежуточной прослойки позволяет снизить микротвердость материала в диффузионной зоне более, чем в два раза по сравнению с соединениями, полученными без промежуточной прослойки, при сохранении коэффициента пластичности на уровне основных материалов.

Выводы

1. При диффузионной сварке сплава  $\gamma$ -TiAl и жаропрочного никелевого сплава в соединении со стороны никелевого сплава формируются дефекты в виде протяженных участков растрескивания,

12. Ustinov A., Olikhovska L., Melnichenko T., Shyshkin A. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Surface and Coatings Technology*, **16**, 3832–3838.
13. Устинов А.И., Мельниченко Т.В., Шишкин А.Е. (2013) Деформационное поведение многослойных вакуумных конденсатов Ti/Al при нагреве в условиях постоянно действующих нагрузок. *Современная электрометаллургия*, **4**, 27–33.
14. Аникеев А.И., Верещака А.А., Верещака А.С., Бубликов Ю.И. (2015) Ультрадисперсные твердые сплавы как инструментальный материал для фрезерования труднообрабатываемых материалов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*, **3**, 152–162.
15. Устинов А.И., Фальченко Ю.В., Ищенко А.Я. и др. (2009) Получение неразъемных соединений сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием многослойной наноструктурной фольги Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме. *Автоматическая сварка*, **1**, 17–21.
16. Устинов А.И., Олиховская Л.А., Мельниченко Т.В. и др. (2008) Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения. *Современная электрометаллургия*, **2**, 19–26.
17. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Печковский Э.П., Мамека Н.А. (2007) Уравнение индентирования. *Доповіди Національної академії наук України*, **12**, 100–106.
18. Zeng K., Schmid-Fetzer R., Huneau B. et al. (1999) The ternary system Al–Ni–Ti Part II: thermodynamic assessment and experimental investigation of polythermal phase equilibria. *Intermetallics*, **12**, 1347–1359.
19. Dyer T.S., Munir Z.A. (1995) The synthesis of nickel aluminides by multilayer self-propagating combustion. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **26**(3), 603–610.
- and Ni-based superalloy using hydrogenated  $Ti_6Al_4V$  interlayer. *Int. J. Hydrog. Energy*, 1882–1887.
6. Li, Z.F., Wu, G.Q., Huang, Z., Ruan, Z.J. (2004) Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*, **58**, 3470–3473.
7. Ramos, A.S., Vieira, M.T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M.F. (2009) Joining of superalloys to intermetallics using nanolayers. *Advanced Materials Research*, **59**, 225–229.
8. Lyushinsky, A.V. (2001) Criteria of selection of intermediate layers in vacuum diffusion welding of dissimilar materials. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 40–43 [in Russian].
9. Yushtin, A.N., Zamkov, V.N., Sabokar, V.K. et al. (2001) Pressure welding of intermetallic alloy  $\gamma$ -TiAl. *The Paton Welding J.*, **1**, 33–37.
10. Ramos, A.S., Vieira, M.T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M.F. (2010) Reaction-assisted diffusion bonding of advanced materials. *Defect and Diffusion Forum*, 297–301, 972–977.
11. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **8**, 1043–1045.
12. Ustinov, A., Olikhovska, L., Melnichenko, T., Shyshkin, A. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Surface and Coatings Technology*, **16**, 3832–3838.
13. Ustinov, A.I., Melnichenko, T.V., Shishkin, A.E. (2013) Deformational behavior of multilayer Ti/Al foils at heating under the conditions of continuously applied loads. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **4**, 27–33 [in Russian].
14. Anikeev, A.I., Vereshchaka, A.A., Vereshchaka, A.S., Bublikov, Yu.I. (2015) Superdispersed hard alloys as a tool material for milling of hard-to-machine materials. *Izv. Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Povolzhsky Region*, **3**, 152–162 [in Russian].
15. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya. et al. (2009) Producing permanent joints of  $\gamma$ -TiAl based alloys using nanolayered Ti/Al interlayer by vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, **1**, 12–15.
16. Ustinov, A.I., Olikhovskaya, L.A., Melnichenko, T.V. et al. (2008) Solid-phase reactions in heating of multilayer Al/Ti foils produced by electron beam deposition method. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 19–26.
17. Firstov, S.A., Gorban, V.F., Pechkovsky, E.P., Mameka, N.A. (2007) Equation of indentation. *Dopovidi Nats. Akademii Nauk Ukrainy*, **12**, 100–106 [in Russian].
18. Zeng, K., Schmid-Fetzer, R., Huneau, B. et al. (1999) The ternary system Al–Ni–Ti. Pt II: Thermodynamic assessment and experimental investigation of polythermal phase equilibria. *Intermetallics*, **12**, 1347–1359.
19. Dyer, T.S., Munir, Z.A. (1995) The synthesis of nickel aluminides by multilayer self-propagating combustion. *Metallurgical and Materials Transact. B.*, **26**(3), 603–610.

References

1. Bannykh, O.A., Povarova, K.B., Braslavskaya, G.S. et al. (1996) Mechanical properties of cast alloys  $\gamma$ -TiAl. *Metalovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 11–14 [in Russian].
2. Polkin, I.S., Kolachev, B.A., Ilin, A.A. (1997) Titanium aluminides and alloys on their base. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **3**, 32–39 [in Russian].
3. Shorshorov, M.Kh., Erokhin, A.A., Chernyshova, T.A. (1973) *Hot cracks in welding of high-temperature alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Zamkov, V.N., Velikoivanenko, E.A., Sabokar, V.K., Vrzhezhevsky, E.L. (2001) Selection of temperature of preheating of  $\gamma$ -titanium aluminide in electron beam welding. *The Paton Welding J.*, **11**, 17–20.
5. Peng He, Jun Wanga, Tiesong Lin, Haixin Li (2014) Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ІНТЕРМЕТАЛІДА  $\gamma$ -TiAl  
З ЖАРОМІЦНИМ НІКЕЛЕВИМ СПЛАВОМ  
З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОПРОШАРКІВ Al/Ni

Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Мельниченко Т.В., Устинов А.И., Федорчук В.С.

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

Вивчено вплив структурних характеристик та хімічного складу нанощаруватих проміжних прошарків на основі системи Al–Ni на формування з'єднань сплаву на основі  $\gamma$ -TiAl та жароміцного нікелевого сплаву при дифузійному зварюванні у вакуумі. Показано, що застосування нанощаруватих плакованих проміжних прошарків забезпечує формування дифузійної зони з монотонною зміною вмісту компонентів, фазовий склад і мікромеханічні характеристики якої визначаються хімічним складом проміжного прошарку, а також знижує ймовірність формування крихких фаз в стику. Бібліогр. 19, табл. 6, рис. 7.

Ключові слова: дифузійне зварювання в вакуумі, інтерметаліди, нанощаруваті прошарки

## VACUUM DIFFUSION WELDING OF $\gamma$ -TiAl INTERMETALLIC WITH HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY WITH APPLICATION OF INTERMEDIATE AL/NI NANOLAYERS

Iu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, T.V. Melnichenko, A.I. Ustinov, V.E. Fedorchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazymyr Malevych Str., 03680, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

Effect of structural characteristics and chemical composition of intermediate nanolayers based on Al-Ni system on formation of joints of  $\gamma$ -TiAl based alloy and high-temperature nickel alloy in vacuum diffusion welding was studied. It is shown that application of nanolayered clad interlayers ensures formation of a diffusion zone with monotonic change of the content of components, where the phase composition and micromechanical characteristics are determined by the interlayer chemical composition, as well as lowers the probability of brittle phase formation in the butt joint. 19 Ref., 6 Tabl., 7 Fig.

*Keywords: vacuum diffusion welding, intermetallics, nanolayered interlayers*

Поступила в редакцию 10.07.2019

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ



### Газоразрядные электронно-лучевые пушки производства компании «ЧЕРВОНА ХВИЛЯ»

- ▶ работают в широком диапазоне мощностей (от 30 до 600 кВт), что позволяет проектировать оптимальное оборудование для каждого конкретного применения
- ▶ обеспечивают стабильную работу в широком диапазоне вакуума и парциального давления газов (от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  мбар), в том числе в условиях динамично изменяющегося остаточного давления в технологической камере
- ▶ компактны, небольшого веса, просты и надежны в эксплуатации
- ▶ катоды пушек имеют значительный срок службы — 1000 ч и более



## 72-а ЩОРІЧНА АСАМБЛЕЯ МІЖНАРОДНОГО ІНСТИТУТУ ЗВАРЮВАННЯ

Цього разу головна подія року в галузі електрозварювання з країни Південно-Східної Азії перемістилася чи не в самий центр Європи. Міську браму для 72-ої щорічної Генеральної асамблеї Міжнародного інституту зварювання та Міжнародної конференції відкрила столиця Словаччини — гостинна Братислава, що безпосередньо межує відразу з двома державами — Австрією та Угорщиною.

Протягом шести робочих днів, з 7 до 12 червня 2019 р., 789 учасників з 45 країн світу мали можливість прослухати 70 доповідей і 92 презентації, провести відповідні регламенту голосування та вибори, та під шалені оплески учасників цього всесвітнього форуму поздоровити лауреатів професійних нагород за досягнення минулих років в галузі зварювання.

За багаторічною традицією Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України як член Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) взяв участь в роботі форуму. Делегацію очолював представник Інституту в МІЗ учений секретар І.М. Клочков. Разом із ним в роботі форуму взяли участь начальник відділу, кандидат технічних наук М.В. Юрженко, кандидати технічних наук С.І. Мотруніч та С.В. Шваб.



Делегація на МІЗ від ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Останній, разом з тим, є головою Ради наукової молоді Інституту.

Щорічна Генеральна асамблея вважається відкритою після промови президента МІЗ пана Дугласа Р. Лючіані (Канада). В Братиславі ці правила, звичайно ж, були витримані. Після привітань президента МІЗ і його слів на підтвердження того, що кворум є, розпочалася робота 72-ої щорічної Генеральної асамблеї.

В цьому році МІЗ вирішив відзначити внесок в розвиток зварювання та споріднених технологій наступних вчених:

- медаль Уолтера Едстрьома, що заснована шведською делегацією, отримав пан Мін-Чул Хонг (Корея);
- знаки дійсних членів МІЗ (за участь в роботі МІЗ протягом 10 та більше років) отримали почесний професор Хорст Сержак (Австрія), професор Карл Кросс (США), доктор Річард Далбі (Велика Британія), професор Леїф Карлссон (Швеція), професор Америкіо Скотті (Швеція);
- нагороду Артура Сміта, що заснована делегацією Великої Британії, отримав доктор Кота Кадої (Японія);
- нагороду Кріса Смолбона, що заснована членами МІЗ від Болгарії, Греції, Румунії та Сербії, отримав пан Рей Шук (США);
- медаль Томаса, що заснована Американським товариством зварювання, отримав пан Дуглас Кац (США);
- нагороду Йосіаки Арата, що заснована делегацією Японії, отримав професор Леїф Карлссон (Швеція);
- нагороду Халіла Кая Гедіка, що заснована делегацією Туреччини, отримав пан Девід Фінк (США);
- нагороду за кращу у 2018 р. наукову друковану роботу в галузі зварювання, що заснована МІЗ, отримав доктор Вахід Хоссейні (Швеція);
- приз Анрі Граньона, що заснований Французьким інститутом зварювання, отримав доктор Джінсонг Чен (США), доктор Хісаія Комен (Японія), дипломований інженер Александр Ніцше (Німеччина) та доктор-інженер Йонас Хенсель (Німеччина);
- приз Уго Гуеррера, що заснував Італійський інститут зварювання, отримала пані Клаудія Паван (Італія).



Проф. Девід Олсон — лауреат Приза Євгена Патона за 2019 р.

Вже багато років поспіль ІЕЗ ім. Є.О. Патона вручає одну з найпочесніших нагород цього міжнародного форуму — Приз Євгена Патона. Цей рік, як і завжди, спільноту в галузі електрозварювання було висунуто багато претендентів. Виборов же Приз професор зі Сполучених Штатів Америки Девід Олсон за свій внесок в розвиток передових технологій, матеріалів та обладнання для зварювання та споріднених процесів.

Як і торік, і як у попередні роки був вручений ще один приз, що запроваджений ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Учасники щорічних асамблей неофіційно вже назвали його «жіночим призом». Дійсно, номінантом цього призу завжди є жінка з числа членів місцевого оргкомітету по підготовці та проведенню щорічної асамблеї. У 2019 р. Титанова троянда (а саме так офіційно називається цей неофіційний приз) була вручена ученим секретарем ІЕЗ ім. Є.О. Патона І.М. Ключковим під бурхливій оплески присутніх пані Петрі Заводній.

Українські учасники Асамблеї, як і завжди, поїхали в Братиславу не з порожніми портфелями. Поїхали не лише, щоб почути інших, але й представити на розсуд фахівців майже з усього світу зварювання свої напрацювання та здобутки.

На комісії XIII (Опір втомі зварних елементів і конструкцій) Ілля Ключков і Святослав Мотруніч представили доповідь «High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium-lithium alloys under constant and variable amplitude loading». І вже на міжнародній конференції ними ж була представлена стендова доповідь «Fatigue life of thin sheet joints of aluminum-lithium alloys produced by FSW and TIG welding technologies».

На об'єднаному засіданні комісії XI (Трубопроводи та посудини, які експлуатуються під тиском) та підкомісії IX-С (Поведінка металів, які зварюються) було представлено доповідь на тему «Solid experience in the use of continuous monitoring systems pipeline thermal station during the operation on the basis of SHM technologies». До

її авторського колективу входять Лобанов Л.М., Недосека А.Я., Недосека С.А та Мотруніч С.І.

З доповіддю на Комісії XVI (Полімерні з'єднання та адгезивні технології) виступив Максим Юрженко. Тема доповіді — «Structural studies of the welded joints and hypothesis of the welding mechanism of plastics». Він же виступив на міжнародній конференції із доповіддю «Novel theory of plastics welding and its application». Його яскраві виступи заслужили не лише оплески, але й привернули увагу багатьох учасників до його ідей та технологій, що він застосовує в дослідженнях. Крім того, в програмі Комісії VI (Термінологія) він представив розроблений ним і науковим колективом, який він очолює, «Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас».

Як зазначає сам Максим Юрженко, для нього головний результат участі в роботі щорічної Асамблеї МІЗ і Міжнародної конференції — це представлення нашої теорії про механізм зварювання та природу зварних з'єднань полімерів на розсуд світової наукової спільноти. Теорію прийняли, і зразу встановився контакт з TWI (Кембридж). Крім того, взяли в роботу Словник-довідник, і частина термінів зі зварювання пластмас в проекті нового стандарту ISO 4063 вже буде взята з нього, тобто на ньому базуватися.

Вперше серед членів української делегації голова Ради наукової молоді ІЕЗ ім. Є.О. Патона Сергій Шваб взяв участь в роботі WG-RA (Робоча група з питань діяльності в регіонах), виступивши із доповіддю про проведення 19–22 травня 2020 р. в Києві Міжнародної конференції молодих професіоналів зі зварювання та споріднених технологій (YPIC) разом із WRTYS–2020. Ця доповідь була також представлена на засіданні TG-YL (Цільова група молодих лідерів). Важливість цих виступів неможливо недооцінити. Бо вже сьогодні цей захід анонсований на сайті Міжнародного інституту зварювання.

З початку своєї діяльності у 1948 р. Міжнародний інститут зварювання відіграє провідну роль в розвитку зварювання та об'єднанні діяльності членів цієї організації тепер вже з 53 країн світу. Свої функції в МІЗ виконують робочі групи та Міжнародна рада з ліцензування. Тому значення генеральних асамблей членів МІЗ для зростання, актуальності та динамічності цієї організації важко переоцінити.

Цього року поряд із звичайною Генеральною асамблеєю відбувалася Надзвичайна Генеральна асамблея у зв'язку із закінченням контракту між МІЗ та Institut de Soudure (Франція). З 1 січня 2020 р. виконавчий офіс буде знаходитися в італійському Istituto Italiano della Saldatura (IIS)

Group, а обов'язки головного виконавчого директора від пані Сесіль Майєр перейдуть до пана Лука Кости.

Засідання 75 робочих груп відбулось в межах засідань 23 комісій, і проходили вони три дні. Три дні інтенсивних засідань, зустрічей, презентацій тощо. Протягом цього часу робочі групи прийняли 160 рішень, зокрема 144 рішення щодо публікацій в головному виданні *Welding in the World* (Зварювання в світі). Важливими є також прийняті сім рішень, що затверджені Міжнародною організацією стандартизації (ISO), в галузі електрозварювання та суміжних технологій на підтримку розвитку промисловості.

Особливо варто відзначити позитивні рішення Комісії C-VIII Здоров'я, безпека та навколишнє середовище щодо монографії Міжнародної агенції дослідження раку *Welding, Molybdenum Trioxide, and Indium Tin Oxide* та її пояснення щодо зварювальних газів.

Загальні обговорення спеціалістів стосувалися сучасних викликів в галузі передових промислових розробок і технологій, зокрема в двох комісіях обговорювалися питання щодо адитивного виробництва.

В цьому контексті необхідно згадати про три технологічних тури, що були організовані в рамках Асамблеї на нафтопереробний завод «Словнафт», гідроелектростанцію «Габчіково» та завод «Фольк-

сваген», що допомогли учасникам Асамблеї зрозуміти рівень розвитку промисловості в регіоні.

Підтримка молодих професіоналів, які працюють в галузі електрозварювання, є одним з головних завдань МІЗ. В Братиславі спеціальні заходи були організовані для 144 молодих науковців і студентів. Крім того, вони мали можливість представити свої ідеї та обмінятися думками на засіданнях робочих груп. Найкращі виступи були відзначені призами, зокрема призами Словацької академії наук. Один з призів отримав представник ІЕЗ ім. С.О. Патона С.І. Мотруніч.

Неофіційна програма, коли учасники Асамблеї могли зняти краватки та офіційне вбрання, складалася з п'яти заходів. Особливу увагу учасників привернув Словацький вечір, що проходив в Old Market Hall. Гостей пригощали національними стравами, вином, відомим в усьому світі пивом і музичними виступами словацьких артистів.

72-а щорічна Генеральна асамблея МІЗ завершила свою роботу. Від учасників цього форуму організатори — Дослідницький інститут електрозварювання та Словацьке товариство зварювання — почули багато слів подяки.

Братислава передала прапор організаторів Сінгапуру, де 19–24 липня 2020 р. відбудеться 73-я щорічна Генеральна асамблея МІЗ. Потім форум прийматиме італійська Генуя, а в 2022 р. головні події в галузі електрозварювання відбудуться в Токіо.

І.М. Клочков, канд. техн. наук



## Международная конференция «Ti-2019»

14-я Международная конференция по титану, проходившая с 10 по 14 июня 2019 г. в г. Нанте (Франция), является традиционной крупнейшей международной конференцией по титану, которые проводятся раз в 4 года, начиная с 1968 г. Тематика конференций охватывает все этапы производства и использования титана в промышленности, начиная от восстановления губчатого титана и до применения титановых изделий в авиационной, космической технике, медицине, двигателестроении, химическом и энергетическом машиностроении, а также других отраслях. На конференциях представляются результаты исследований за предыдущие четыре года и происходит обсуждение перспективных направлений развития титановой науки и промышленности.

Работа конференции проходила в виде пленарных и секционных заседаний, а также представ-

ления стендовых докладов. Всего работало 11 секций: аддитивные технологии; аэрокосмическое применение; биомедицинское применение; коррозионные свойства; восстановление и производство порошков; интерметаллиды и композиты; промышленное применение; плавка и литье; зависимость свойств от микроструктуры; микроструктура; деформационная обработка.

В работе конференции приняло участие почти 800 человек из 34 стран мира, было представлено 477 устных докладов, в том числе 7 пленарных докладов и 14 ключевых лекций, а также 86 стендовых докладов.

Параллельно с работой конференции проходила выставка изделий из титана, в которой приняло участие 25 фирм, в том числе такие известные, как Aubert & Duvaul (Франция), TIMET (США),

Voestolpine Bohler Bleche GmbH (Австрия), ВСМПО-АВИСМА (Россия) и др.

На конференции большое внимание было обращено на развитие аддитивных технологий применительно к титану. С этой тематикой так или иначе было связано до 30 % всех докладов. Тематика докладов касалась как разработки 3D-аддитивных технологий и оборудования для их реализации, так и исследования структуры и свойств получаемых изделий, а также производства расходных материалов (титановые проволока и порошок).

В настоящее время ведутся работы по внедрению аддитивных технологий в титановую промышленность. Так, например, в ЕС активно работает проект по изготовлению методами аддитивных технологий изделий для космической техники, который совместно финансируется промышленными предприятиями (45 млн евро) и из бюджета Европейского Союза (30 млн евро). Причем работы охватывают все этапы создания изделий: проектирование, изготовление, исследование эксплуатационных характеристик получаемых деталей. В процессе проектирования изделия методами математического моделирования оценивают напряженно-деформированное состояние и создают конструкции с равномерной удельной нагрузкой. При этом получаемые формы таких конструкций зачастую другими способами, чем 3D-аддитивными технологиями, получить невозможно.

Из всего разнообразия аддитивных технологий в промышленности наибольшее распространение получают технологии наплавки проволокой или порошком, что обусловлено их более высокой производительностью по сравнению с bed-технологиями сплавления. Следует отметить, что механические характеристики наплавляемого металла ниже, чем у полуфабрикатов титановых сплавов, получаемых методами термомеханической обработки, поэтому конечные изделия подвергаются, как правило, изостатическому прессованию. В целом, стоимость получаемых по 3D-аддитивным технологиям изделий оказывается достаточно высокой, а основной выигрыш заключается в изменении конструкции изделий, что позволяет при сохранении прочностных параметров деталей снизить их массу до 40 %.

Касательно применения титана в промышленности следует отметить рост объемов потребления титановых сплавов в традиционных отраслях применения титана: самолето- и двигателестро-

нии. Рост доли титана в общей массе планера самолета обусловлен тем, что он практически не взаимодействует химически с углепластиковыми и другими композитными материалами, применение которых в самолетостроении стремительно растет. Поэтому значительная часть силовой арматуры в перспективных самолетах изготавливается из титановых сплавов. Увеличение объема применения титановых сплавов в газотурбинных двигателях объясняется активным внедрением в их конструкцию деталей из алюминидов титана, в том числе лопаток.

В докладе специалистов фирмы «Дженерал электрик Авиэйшн» путем обработки больших массивов статистических данных о качестве слитков и полуфабрикатов титановых сплавов было убедительно показано преимущество технологии переплава с промежуточной емкостью (ЭЛП или ПДП) с последующим гомогенизирующим вакуумно-дуговым переплавом над технологией трехкратного ВДП с точки зрения удаления тугоплавких включений из титановых сплавов, предназначенных для изделий ответственного назначения в авиации.

Основные доклады в области сварки были посвящены исследованиям в области сварки титана трением с перемешиванием и диффузионной сварки титана с другими металлами.

От Украины на конференции были представлены доклады «Электронно-лучевая плавка слитков алюминидов титана» (ИЭС им. Е.О. Патона), «Возможность использования полученных методом электронно-лучевой плавки титановых сплавов в качестве броневых материалов» (ИМ им. Г.В. Курдюмова, ИЭС им. Е.О. Патона), «Получение  $\beta$ -титановых сплавов методами гидридной порошковой металлургии» (ИМ им. Г.В. Курдюмова), «Микроструктура и свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом 3D-аддитивной электронно-лучевой наплавки» (ПрАТ «Червона хвиля», ИМ им. Г.В. Курдюмова), которые вызвали большой интерес участников конференции.

В целом, в настоящее время рынок титана находится в стадии устойчивого роста на 5...7 % ежегодно, а перспективными направлениями развития титановой индустрии являются расширение использования 3D-аддитивных технологий титана и применение сплавов на основе алюминидов титана в аэрокосмическом секторе промышленности.

С.В. Ахонин, д-р техн. наук

## ПАМ'ЯТІ Г.М. ГРИГОРЕНКА



На 81-му році пішов з життя доктор технічних наук, професор, академік НАН України, відомий вчений в галузі спеціальної електromеталургії, матеріалознавства та зварювання, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1980), премії імені Є.О. Патона НАН України (2017), премії

Кабінету Міністрів України (2019) Георгій Михайлович Григоренко.

Вся трудова, наукова та педагогічна діяльність Георгія Михайловича пов'язана з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, в який він прийшов у 1961 р. на дипломну практику ще студентом Київського політехнічного інституту.

Основні напрямки його наукової діяльності — фізична хімія пірометалургійних процесів, матеріалознавство, теорія і технологія зварювальних процесів, спеціальна електromеталургія.

Він отримав вагомі результати в термодинаміці і кінетиці взаємодії газів з рідкими металами і сплавами при різних способах плавлення металу: індукційному, дуговому, плазмово-дуговому, електрошлаковому. Брав безпосередню участь у розробці нових методів обладнання та технології плазмово-дугового, дугошлакового переplastів, електрошлакової технології, індукційного плавлення з комбінованими джерелами нагрівання та у водоохолоджуваних секційних кристалізаторах.

Розробляв технології плавлення високоазотистих сталей з легуванням металу з газової фази. Вперше проаналізував і класифікував газообмінні процеси в електromеталургії при плавці та переplastі.

Г.М. Григоренко встановив взаємозв'язок між швидкістю деформації, формуванням структурних комплексів і метастабільних фаз з міцністю в зоні

з'єднання різнорідних металів з обмеженою розчинністю при зварюванні тиском.

Він дослідив співвідношення структурних складових і неметалевих включень в металі швів при електродуговому зварюванні, які дозволяють керувати процесами формування оптимальної структури для отримання найбільш високих показників міцності й пластичності зварних з'єднань низьколегованої сталі, стійкої щодо крихкого руйнування. Провів теоретичні й експериментальні дослідження особливостей формування хімічної і структурної неоднорідностей, що впливають на міцність, зародження тріщин та руйнування жаростійких сплавів, зварних з'єднань високоміцних трубних сталей і алюмінієвих сплавів зі скандієм та літієм.

Понад 35 років Георгій Михайлович очолював один з найбільших відділів ІЕЗ ім. Є.О. Патона — відділ фізико-хімічних методів досліджень матеріалів.

З 1993 р. Г.М. Григоренко був заступником головного редактора журналу «Современная электromеталлургия», входив до редколегії журналу «Автоматическая сварка» та ще двох журналів, один з яких видається у Польщі.

Активну наукову діяльність поєднував із педагогічною: працював заступником завідувача кафедри Московського фізико-технічного інституту (1982–2015 рр.), професором НТУУ «Київський політехнічний інститут» (1999–2013 рр.).

Підготував 7 докторів і 11 кандидатів наук. За великий внесок у розвиток вітчизняної науки та освіти, міжнародних наукових контактів Георгія Михайловича було відзначено медаллю «За трудову доблесть» (1984), Почесною грамотою Верховної Ради України (2004), відзнаками Національної академії наук України «За підготовку наукової зміни» (2008), «За наукові досягнення» (2009), «За професійні здобутки» (2014).

Світла пам'ять про Г.М. Григоренка надовго залишиться в серцях тих, хто його знав, разом з ним працював та жив.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона,  
редколегія журналу.



## АМЕРИКАНСКОМУ СВАРОЧНОМУ ОБЩЕСТВУ — 100

Американское сварочное общество  
(American Welding Society – AWS) — организация,  
занимающаяся проблемами стандартизации процессов сварки,  
соединений деталей, пайки, резки, наплавки и газотермического напыления

Основано в 1919 г. как некоммерческая организация для совершенствования теоретических основ, способов практического применения сварочных работ и смежных с ними областей, связанных с соединением деталей как в производственных помещениях, так и в высотных конструкциях, как при производстве военной техники, так и бытовых изделий.

В настоящее время AWS продолжает свою деятельность по поддержке совершенствования знаний и технологий в области выполнения сварки.

В AWS состоят более 73000 человек и более 1300 корпоративных членов по всему миру, объединившихся с целью содействия развитию технологии, теории и практики сварки. Членами общества являются инженеры, ученые, педагоги, исследователи, сварщики, инспекторы, коммерческие партнеры, руководители компаний и служащие, круг интересов которых включает автоматическую, полуавтоматическую и ручную сварку, наплавку, напыление, пайку твердым припоем, пайку мягким припоем, а также вопросы, касающиеся безопасности и здоровья.



Любопытным для читателей нашего журнала может быть знакомство с опубликованной в первом выпуске «сварочного» журнала AWS «Welding Journal», 100 лет назад (в год основания Американского сварочного общества), статьи А. Adams.

Ниже представляем ее перевод.

### Наши перспективы

*Весь цивилизованный мир находится в состоянии брожения. В чем же причина? Кто-то говорит, что это война, но разве это не банальное объяснение? А может война была просто стимулом или механизмом запуска уже начавшегося брожения? Дело в том, что работа инженеров оказала сильное воздействие на сближение разных точек планеты, сделала нации взаимозависимыми друг от друга. Это сделало не только возможным, но и*

необходимым появление громадных объединений или организаций всех типов. Пока человечество не научилось контролировать «силу» этих огромных организаций, независимо от того говорим ли мы о силе наций, капитала или рабочего класса. Мы еще не знаем, как заставить их служить обществу и, таким образом, сделать мир лучшим местом для жизни. Великая война окончена, но дух войны все еще не перестал доминировать. Единственная разница заключается в размере действующих элементов — либо это противостояние наций друг против друга, организаций с большим капиталом друг против друга, организаций с большим капиталом против рабочих организаций или даже борьба между рабочими организациями, каждая из которых пытается поставить себя выше других. Но насколько это все бесполезно, если это ничто иное, как межгрупповое соперничество за большую долю богатства, созданного ими всеми, борьба чтобы подняться стоя на спине другого, получить нечто, обобрава другого. Такой тип войны это просто бесполезная трата времени и энергии в обычном понимании что такое война и, более того, она идет без остановки, в то время как в просто войне могут быть перемирия. Это может привести только к снижению общей производительности труда и, следовательно, к средней его оплате. Более того, этот вид войны почти всегда неизбежно формирует привычку врать и не доверять или, по крайней мере, «растягивать» правду, что является одним из самых негативных факторов деловой жизни. Я не говорю о чистой, здоровой конкуренции.

Это самая простая аксиома, если перестать размышлять — и мало кто когда-либо задумывался, что единственный путь в долгосрочной перспективе, для благосостояния рабочего класса в целом, создать больше богатства, и единственный способ создать больше богатства — это повысить производительность труда, или, если использовать слово, которым часто злоупотребляют, повысить эффективность труда, что с одной стороны означает сотрудничество, а с другой — внедрение методов сокращения трудовых затрат.

И именно здесь к работе подключается Американское Сварочное Общество, поскольку одной из его основных функций является расширение области применения сварки, которая является одним из наилучших процессов сокращения трудовых затрат в последние несколько десятилетий. Его предшественник, Комитет по сварке Корпорации оперативного флота, был во многом вдохновлен духом сотрудничества, и у создателей Общества есть надежда, что этот дух будет продолжать распространяться.

Область дальнейшего применения сварки огромна, но это дальнейшее применение затягивается отсутствием полных знаний о технике сварки и крайне запутанными и, во многих случаях, диаметрально противоположными требованиями конкуренции интересов. Эти препятствия должны быть устранены, и они могут быть устранены путем успешного проведения исследовательской работы и развития духа сотрудничества, который позволит откровенно и открыто обсудить достоинства различных процессов, и достичь разумного соглашения в отношении этих достоинств.

Если вы были бы потенциальным пользователем сварки и сомневались в том, использовать ли метод газовой или электрической сварки или ни один из них, считаете ли вы, что ваша уверенность в любом из этих процессов выросла бы, если бы сторонники одного из них утверждали, что это единственный безопасный и экономичный метод? Насколько больше уверенности у вас, несомненно, было бы, если бы сторонник каждого из них сказал вам, что в той или иной области предпочтительнее другой способ сварки.

Я не призываю к выполнению невозможного, а скорее пытаюсь определить принципы здравого смысла, уже признанные успешными во многих сферах бизнеса, применение которых обязательно должно дать наилучшие результаты для всех заинтересованных сторон. В этом заключается наша работа, давайте подходить к ней с уверенностью, энергией и энтузиазмом, и давайте помнить, что ее успешное завершение будет не только много значить для сварочной промышленности, но и увеличит среднюю производительность труда, и, следовательно, в какой-то степени, поможет решить самую большую проблему этого очень критического периода мировой истории.

## СТРАТЕГИЯ ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» производит порошковые проволоки для сварки, наплавки и электродуговой металлизации. За 26 лет существования предприятие заняло лидирующие позиции среди аналогичных производств Украины и стран СНГ.

Одним из основных направлений развития предприятия является расширение экспорта продукции ВЕЛТЕК®, в частности, в страны Евросоюза. Высокие требования к качеству продукции и насыщенность рынка Европы обусловили необходимость выполнения комплекса работ для успешной конкуренции. Они включают:

- ▶ закупку и модернизацию оборудования для совершенствования производства и упаковки продукции на уровне лучших мировых образцов;

- ▶ организацию подготовки специалистов непосредственно на предприятии, что важно в условиях дефицита квалифицированных кадров на рынке труда Украины;

- ▶ разработку и подготовку реализации проволок, востребованных на современном рынке сварочных материалов;

Документальное подтверждение авторитетными органами по сертификации стабильно высокого качества продукции и задекларированных характеристик.

В рамках отмеченной стратегии компания на протяжении последних нескольких лет закупила в Италии и ввела в эксплуатацию станки по рядной намотке проволоки на кассеты и в большегрузные бочки (100...250 кг). С использованием специальной оснастки (Eurolls, Италия) изготовлен совмкратный стан для производства и перетяжки проволоки до диаметра 1,0...1,2 мм. Усовершенствована технология производства и поэтапного контроля порошковой проволоки, особенно малых диаметров (1,0; 1,2 и 1,4 мм).

Трудовой коллектив предприятия пополнился группой молодых специалистов, окончивших и заканчивающих высшие учебные заведения. Обучение и повышение квалификации происходит не только в условиях предприятия, но и при участии в профессиональных выставках, конференциях и семинарах (Украина, Беларусь, Словакия, Германия, Румыния).

Важную роль в работе предприятия играет научно-технический отдел. Непрерывный мониторинг и анализ тенденций на рынке сварочных материалов показал, что сегодня на рынке особо востребованы металлпорошковые сварочные проволоки. В ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» разработана и прошла масштабные испытания металлпорошковая проволока марки ТМВ-МК5, предназначенная для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей в среде смеси защитных газов (80 % Ar и 20 % CO<sub>2</sub>). Проволока характеризуется высокой производительностью наплавки. Основные диаметры проволоки — 1,0; 1,2; 1,6 мм. При сварке этой проволокой образуется малое количество сварочного аэрозоля, наблюдается незначительное набрызгивание, обеспечивается благоприятное формирование наплавляемого металла. Количество легкоудаляемого шлака сопоставимо с образующимся при сварке сплошной проволокой. Наплавленный металл обеспечивает высокий уровень механических характеристик. Для наплавки преимущественно рабочих поверхностей почвообрабатывающей техники разработана самозащитная порошковая проволока марки ВЕЛТЕК-Н634. Основной выпускаемый диаметр — 1,2 мм. Наплавленный металл характеризуется твердостью HRC 60...64, имеет исключительно высокую сопротивляемость абразивному износу в работе с грунтом и минералами. Проволока получила положительную оценку и планируется к продаже в 2020 г. в Словакию.

Еще одна новая марка самозащитной наплавочной порошковой проволоки (ВЕЛТЕК-Н650) прошла успешные испытания в Румынии и готовится к продаже. Проволока выпускается диаметром 1,6 мм. Наплавленный металл имеет твердость HRC 62...66, обеспечивает высокую стойкость в условиях абразивного, газо- и гидроабразивного изнашивания с пониженной ударной нагрузкой.

Высокие эксплуатационные показатели наплавленного металла продемонстрировала при широких испытаниях порошковая проволока марки ВЕЛТЕК-Н351. Основное назначение ее: наплавка и ремонт дефектных участков железнодорожных путей (стыков рельсовых окончаний, пробуксовин, остряков и др.), трамвайных рельсов. Проволока изготавливается в основном диаметром 1,6 мм, может использоваться как самозащитная, так и с дополнительной защитой дуги флюсом или газами.

Предприятие ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» организовало систематическую работу по подготовке, внедрению и поддержанию на предприятии системы менеджмента качества. Внедрение системы менеджмента качества позволило выявить узкие места в производстве, неэффективные моменты и оптимизировать технологию производства, создать эффективную документированную систему контроля процесса производства, которое обеспечивает прослеживаемость и прогнозируемость качества выпускаемой продукции. Это повысило ответственность, технологическую дисциплину и прозрачность работы персонала. Система менеджмента качества производства ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» соответствует ISO 9001 версии 2015 г. и сертифицирована Центром DVS Zert (Германия). Предприятие получило право маркировать проволоки ВЕЛТЕК® знаком CE после соответствующих квалификационных испытаний и аудита производства TÜF Rheinland (Германия). Сварочные проволоки ВЕЛТЕК® прошли испытания и имеют сертификат соответствия СЕПРОЗ НАН Украины.



А.А. Голякевич

## Рождение и становление электрошлаковой сварки

История создания и развития электрошлаковой сварки (ЭШС) описана в работах самих изобретателей и других сотрудников ИЭС им. Е.О. Патона, а также проанализирована в отдельных исторических исследованиях.

В 1960 г. Д. Томас, президент фирмы «Аркос», написал статью, в которой ознакомил читателей «Welding Journal» с принципами ЭШС, техникой сварки, металлургическими особенностями и экономическими показателями. В разделе «История» он отметил, что идея сварки вертикальных швов и их формирования с помощью графитовых неплавящихся ползунов принадлежит российскому инженеру Н.Н. Бенардосу, а принципиально новый процесс с такой схемой создан в ИЭС им. Е.О. Патона в Киеве и первоначально назван в литературе «процессом вертикальной сварки».

Цель настоящей публикации — показать организационные условия и как в процессе выполнения задач по применению автоматической сварки под флюсом для ремонтно-восстановительных работ в Институте электросварки под руководством Е.О. Патона элементы одной из инновационных технологий легли в основу ЭШС.

Военные действия на территории СССР нанесли огромный ущерб народному хозяйству.

В 1941–1944 гг. было разрушено 1710 городов и поселков городского типа, свыше 70 тыс. сел и деревень, взорвано и выведено из строя 31850 заводов и фабрик, 1135 шахт, 65 тыс. км железнодорожных путей, было разорено свыше 100 тыс. колхозов, совхозов и машинотракторных станций, посевные площади сократились на 36,8 млн га, т. е. на четверть. Урон, причиненный Советскому Союзу, превышал потери в период второй мировой войны всех других европейских государств вместе взятых.

Еще в 1943 г. руководство СССР приняло постановление «О неотложных мерах по восстановлению хозяйства в районах, освобожденных от немецкой оккупации». А в конце мая 1945 г. Государственный комитет обороны постановил перевести часть оборонных предприятий на выпуск товаров для населения. Государственный бюджет на 1945 и 1946 гг. предусматривал сокращение военных расходов, резкое увеличение ассигнований на развитие народного хозяйства, на социально-культурное строительство. Был принят закон о демобилизации и к концу 1947 г. было демобилизовано 8,5 млн человек. Производство военной продукции сократили на 40 млрд руб., по сравнению с 1944 г., а производство гражданской продукции увеличили с 3,8 млрд руб. в 1944 г. до 12,8 млрд руб. в 1946 г.

В то время, когда основные ресурсы СССР были направлены на восстановление экономики, в США приступили к производству вооружения, энергетического оборудования, машин нового поколения. В частности, для сверхзвуковой авиации планировалось штамповать целиком крылья и элементы фюзеляжа из титановых сплавов. И чтобы изготовить мощные огромные прессы, строили огромные металлургические заводы. Руководство СССР обратилось к Е.О. Патону с просьбой оказать помощь в сооружении мощнейших мартеновских печей, прокатных станов, кузнечно-прессового оборудования. Неожиданно академик предложил не строительство новых мощных литейных и других цехов, а изготавливать прессы и другую технику неограниченной мощности из уже имеющихся заготовок.

Этому смелому отказу и немислимому предложению предшествовали упорные целенаправленные исследования по конверсии военных технологий автоматической дуговой сварки под флюсом и, как многие полагают, случайное изобретение нового вида соединений металлов — ЭШС.

В мае 1944 г. ИЭС возвратился в Киев. До конца года были модернизированы сварочные головки и автоматическая сварка под флюсом была успешно внедрена на двенадцати крупных предприятиях, в том числе на Киевском заводе «Ленинская кузница», Днепропетровском заводе металлоконструкций им. В.М. Молотова и др.

Автоматическая дуговая сварка была возможна только в нижнем положении, а швы на домнах, мостах, резервуарах, зданиях реально располагаются во всех пространственных положениях. Необходимо было создать оборудование и технологию автоматической сварки швов, располагающихся на вертикальных и наклонных плоскостях. Решать проблему сварки вертикальных швов Е.О. Патон поручил Г.З. Волошкевичу.

Спустя 35 лет ветераны ИЭС вспоминали: «Ежедневный обход директор ИЭС начинал с рабочего места Волошкевича. Подолгу обсуждали различные варианты и идеи. Нужно было решить фантастические проблемы. Автомат не мог вести вертикальный шов — расплавленный металл просто стекал бы вниз. К Волошкевичу Евгений Оскарович приходил и второй раз в день — в 17.30... Но на чертежной доске вверх карабкались смешные фигурки, а не автомат для скоростной сварки... После длительных поисков Волошкевич и предложил Евгению Оскаровичу попробовать способ, который позже будет назван принудительным формированием сварочной ванны:

- С двух сторон зазор между свариваемыми торцами нужно прикрыть медными ползунами и накладками. В результате получится что-то вроде колодца, и...



Патон Б.Е. и Волошкевич Г.З. у нового аппарата электрошлаковой сварки

следующего года началось массовое применение сварочных операций снизилась в несколько раз.

Однако не все было так просто — возникли непредвиденные трудности. При соединении стыков толщиной более двух десятков миллиметров, при глубокой шлаковой ванне, перегреве ванны и некоторых других невыясненных условиях, дуговой процесс становился неустойчивым и даже прекращался. В ходе борьбы за устойчивость дуги обнаружилось, что ... можно обойтись и без нее! Иногда электродный металл, флюс и кромки плавилась, хотя осциллограммы свидетельствовали, что дуга погасла. Волошкевич занялся этими случайностями, и, как часто бывает в изобретательской практике, случайность превратил в закономерность. Оказалось, что при некоторых условиях плавление проходит за счет «джоулевого» тепла, выделяющегося при прохождении тока через жидкий шлак. К решению проблем управления этим процессом приступил заведующий электротехническим отделом Б.Е. Патон.

В 1949 г. Г.З. Волошкевич и Б.Е. Патон добились высокой стабильности процесса при сварке за один проход соединений значительной толщины. Б.Е. Патон нашел возможность саморегулирования, разработал соответствующее оборудование и развернул системные исследования физических и металлургических особенностей нового вида сварки. Он сосредоточил силы нескольких отделов ИЭС на решении и совершенствовании наиболее важных проблем ЭШС. Кроме ЭШС сталей различного назначения были разработаны технологии и флюсы для изготовления толстостенных ответственных конструкций из алюминия, титана, меди и их сплавов. Были разработаны специальные флюсы, источники питания и аппараты управления, методы снижения напряжений и деформаций. Уже к 1956 г. объема выполненных исследований и разработок было достаточно для издания под редакцией Б.Е. Патона первой в мире монографии «Электрошлаковая сварка». В истории техники неизвестно подобных темпов развития каких-либо других видов сварки.

Спустя пол века Борис Евгеньевич так оценивает историю и значение ЭШС: «Институт электросварки, созданный Евгением Оскаровичем Патоном в 1934 г., является первой в мире научно-исследовательской организацией по проблемам сварочного производства. ... Благодаря разработанной Е.О. Патоном структуре, подбору и воспитанию специалистов институт сразу же начал быстро самостоятельно создавать новые технологии, начиная от идеи и кончая внедрением. ... Над проблемами сварочного производства работали во многих странах, но благодаря такой организации в Институте электросварки созданы изобретения, решившие многие проблемы экономического развития страны, научно-технического прогресса, ставшие основой новых отраслей техники...

И тем не менее наибольшим нашим изобретением, которым гордится институт, и должна гордиться страна, является ЭШС. Этот принципиально новый вид сварки может быть занесен в книгу технических рекордов, так как он выполняет соединения металлов практически неограниченной толщины ... за один проход. Как и всякие сложные технологии, ЭШС до сих пор продолжает развиваться, но первые изобретения и применение этой сварки были сделаны еще при жизни Евгения Оскаровича. Следует вспомнить, что это был период холодной войны, период очень ограниченной информации и влияния зарубежных достижений. И когда Н.С. Хрущев начал налаживать контакты, коллеги в США, узнав о награждении нас Ленинской премией, комментировали коротко: «Этого не может быть». Вскоре во многих странах были получены патенты, ряд фирм купили лицензии. В 1958 г. это изобретение было отмечено Гран-При на Всемирной выставке в Брюсселе, а наши специалисты внедряли ЭШС в Японии, Китае, ФРГ и др. странах. Технология эта открыла возможности изготовления ответственных конструкций атомной энергетики, мощных прессов, статоров и роторов турбин, кораблей нового поколения и изделий других отраслей, причем как из стали, так и из алюминиевых, титановых и прочих сплавов. А процесс электрошлакового переплава стал основой для новой

- Погодите, — спросил Патон, — из какого же материала накладки?

- Из меди.

- Но ведь у меди температура плавления ниже, чем у стали? Ваши накладки потекут раньше, чем дуга расплавит для сварки сталь.

Волошкевич предложил охлаждать накладки (их теперь называют также башмаками) и этим предохранил медь от расплавления».

Эксперименты показали — шлак на охлаждаемых водой ползунах застывал и эта корочка предохраняла жидкий металл от вытекания и приваривания к меди. Ползун скользил и обеспечивал хорошее формирование шва. Впервые в мире, в 1948 г. на заводе «Запорожсталь», Г.З. Волошкевичем были сварены автоматом в монтажных условиях четыре пояса строящейся доменной печи. Со

отрасли металлургии, защищены сотнями авторских свидетельств и зарубежных патентов на изобретения. И этим всемирным признанием может гордиться страна».

Действительно, ЭШС коренным образом изменила стратегию развития тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. Она была внедрена на сотнях заводов многих отраслей промышленности. А когда было опубликовано сообщение о награждении Г.З. Волошкевича, Б.Е. Патона, И.Г. Гузенко, И.Д. Давиденко и В.Г. Радченко Ленинской премией «За создание и внедрение в тяжелое машиностроение электрошлаковой сварки», в зарубежных журналах появились комментарии: «Такого не может быть! Это блеф и пропаганда!».

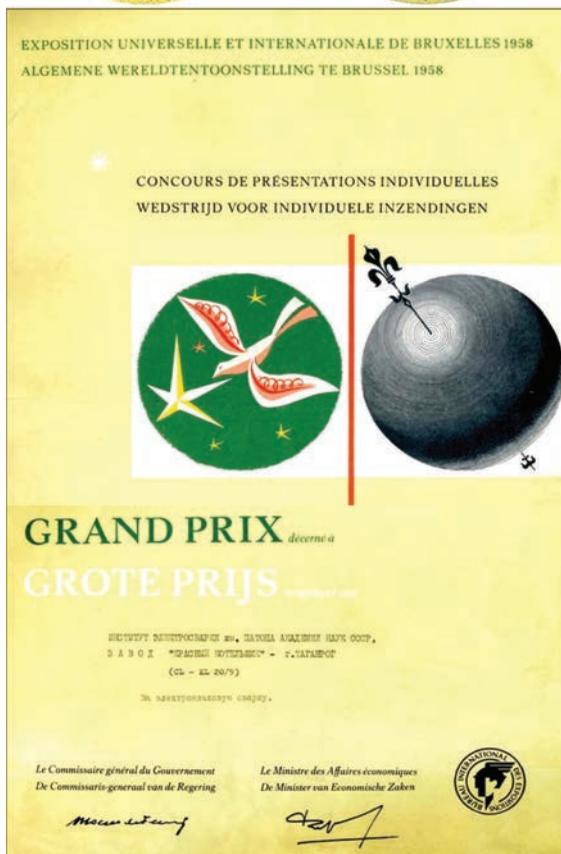
В становление, развитие и широкое внедрение ЭШС творческий вклад внесли сотрудники лаборатории самого Г.З. Волошкевича: И.И. Сущук-Слюсаренко, В.М. Хрундже, И.И. Лычко, С.М. Козулин и др. В создании научных основ участвовали также сотрудники других отделов и лабораторий ИЭС (Ю.А. Стеренбоген, Ю.Н. Готальский, А.М. Макара, В.И. Новиков, Д.А. Дудко, В.К. Лебедев, М.Н. Сидоренко), разработкой специальных аппаратов занимались опытные конструкторы (П.И. Севбо, В.Е. Патон, М.Д. Литвинчук, Р.И. Лашкевич). Кроме ЭШС сталей различного назначения были разработаны технологии и флюсы для изготовления толстостенных ответственных конструкций из других металлов и их сплавов: алюминия, (Д.М. Рабкин, А.Н. Сафонников, А.Г. Синчук), титана (С.М. Гуревич, Я.Ю. Компан), меди (И.И. Лычко, В.М. Илюшенко, А.П. Алексеенко).

К освоению технологий и совершенствованию нового вида сварки подключились специалисты ряда заводов, где патоновцы начали внедрять ЭШС: Таганрогского завода «Красный котельщик» (ТКЗ), Барнаульского котельного завода, Новокраматорского машиностроительного завода им. И.В. Сталина (НКМЗ), Ленинградского металлического завода и др.

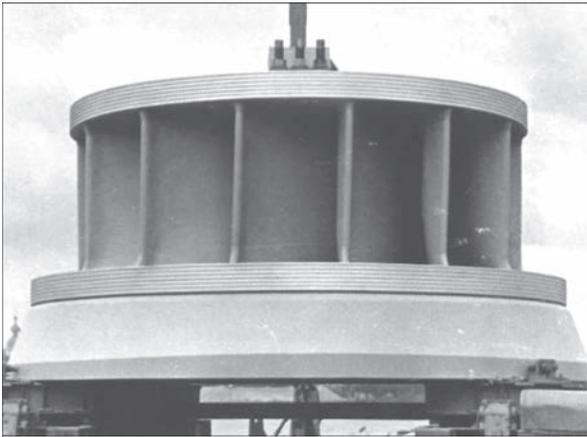
В 1954–1955 гг. были разработаны оборудование и технологии: многоэлектродной сварки и сварки пластинчатым мундштуком швов больших сечений (до 1000 м), техника замыкания кольцевых швов и др.; в 1956–1957 гг. создана технология плавящимся мундштуком. Из толстолистовых элементов с применением ЭШС на НКМЗ изготавливали ковочно-штамповочные прессы усилием 40 МН, станины прокатных станов со сварным сечением до 900×900 мм; оборудование для металлургических заводов, статоры и валы гидрогенераторов и гидротурбин для ГЭС. На Ижорском заводе им. А.А. Жданова (Ленинград, сегодня С.–Петербург) по технологии, разработанной в содружестве со специалистами ИЭС и ЦНИИ технологии машиностроения (Москва), была изготовлена сварно-кованая заготовка ротора турбогенератора мощностью 1000 МВт. На Уральском заводе тяжелого машиностроения им. С. Орджоникидзе (Свердловск, сегодня Екатеринбург) была освоена ЭШС шагающих экскаваторов, дробилок, прессов.

Неудачи подстерегли создателей нового вида соединения на пути официальной регистрации, патентования и продажи лицензий. В 1951 г. Г.З. Волошкевич подал первую основополагающую заявку на авторское свидетельство СССР на ЭШС. (Без получения такого свидетельства запрещалось патентование за рубежом). В течение пяти лет в ВНИИГПЭ пытались разобраться в сути нового вида сварки и только в сентябре 1956 г. было опубликовано решение о выдаче приоритетного документа — авторского свидетельства СССР.

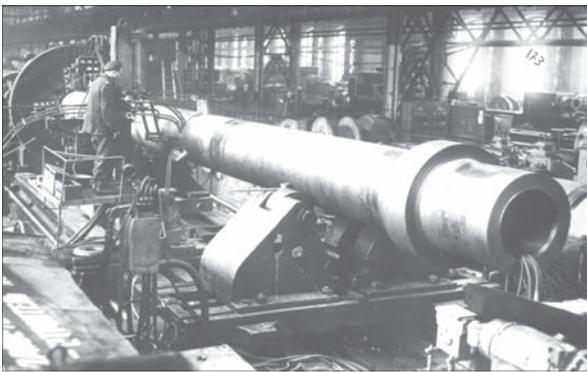
Однако еще ранее из Москвы поступило указание, в соответствии с правилами СЭВ, передать Чехословакии безвозмездно документацию по ЭШС. В июне в Киеве побывал директор Института сварочных машин и технологий Й. Чабелка и другие специалисты, ознакомившиеся с секретами ЭШС. ИЭС им. Е.О. Патона подарил Чехословакии



В 1958 г. на Всемирной выставке в Брюсселе новый вид соединения был удостоен высшей награды — Гран-При



Сварно-кованая заготовка ротора турбогенератора мощностью 1000 МВт, изготовленная на Ижорском заводе (С.-Петербург, РФ)



Вал судового двигателя, сваренный на Заводе имени Ильича (г. Мариуполь)

ных гидравлических прессов в Германии и Японии и т. д. В Японии ЭШС была впервые применена на строительстве доменной печи Кимицуского металлургического завода (фирма «Син-нихон сэйтэцу К<sup>о</sup>, Лтд»). В судостроении широко использовали советские сварочные аппараты типа А-820м. Японской фирмой «Ничимен» были приобретены сварочные аппараты А-1304 и А-550У с трансформаторами ТШС-3000/3 и ТШС-10000/1. Аппараты смонтированы на одном из предприятий фирмы «Сумитомом кемикл К<sup>о</sup>» и использовались для изготовления алюминиевой ошиновки электролизных ванн.

Во многих случаях ЭШС стала завершающей операцией по изготовлению мощных машин и высоконагруженных конструкций — изделию любой формы практически неограниченных размеров и массы из отлитых, кованных и прокатанных заготовок сравнительно небольшой массы. Возник новый класс сварных конструкций — сварно-литые, сварно-кованные, сварно-прокатные.

В ИЭС им. Е.О. Патона с участием других организаций продолжали совершенствовать ЭШС, расширяя область применения, улучшая качество соединений и оборудования. Так, в 1968 г. Б.Е. Патон и Б.И. Медовар разработали новый метод ЭШС с бифилярным подключением к источнику питания электродов большого сечения.

Одновременно с развитием сварочной технологии разрабатывалась электрошлаковая наплавка, в том числе: в нижнем положении, в вертикальном положении с использованием формирующих ползунов, стыкошлаковая наплавка и др.

Б.Е. Патон первым увидел, что в электрошлаковом процессе можно получить металлы особо высокого качества. В 1952 г. в ИЭС был получен первый слиток небольшого размера, при плавлении расходоуемого электрода в шлаковой ванне, нагреваемой проходящим через нее электрическим током. Одновременно с развитием ЭШС в ИЭС началось изучение путей применения сварочной металлургии или сварочной физико-химии, сварочной техники, при получении слитков для прокатки иковки. Электрошлаковый переплав решил еще одну чрезвычайно важную задачу технического прогресса — производство высококачественного металла, в первую очередь стали.

аппарат А-372р, помог изготовить еще один аппарат и освоить технологию ЭШС. Без ведома ИЭС чехословацкие товарищи продали технологию и аппарат Бельгийской фирме. В 1956 г. ИЭС также подарил аппарат и техническую документацию Центральному институту сварки в Галле, который приступил к внедрению ЭШС на предприятиях ГДР.

Итоги становления и развития ЭШС за десять лет подвел Б.Е. Патон в программном докладе на конгрессе МИС в 1960 г. (Бельгия). В докладе подробно рассматривались технология сварки, металлургические особенности электрошлакового процесса при соединении всех типов сталей, в том числе нержавеющих, проводились многочисленные примеры использования сварки в тяжелом энергетическом машиностроении, судостроении и др. отраслях СССР. Б.Е. Патон отмечал: «Электрошлаковая сварка нашла применение более чем на 50-ти заводах в КНР, ГДР и Чехословакии, а также к этому времени ее применение расширяется в Швеции и ФРГ. Первые шаги по использованию новой технологии делают фирмы США, Великобритании и Франции» [17]. 17–21 апреля 1961 г. в Нью-Йорке состоялась 42-я ежегодная конференция Американского сварочного общества, на которой с большим докладом выступил Б.Е. Патон. Он остановился на научных основах, энергетических характеристиках, технике ЭШС, оборудовании и областях применения.

К 1960 г. ЭШС использовали в нескольких восточно-европейских странах, для изготовления конструкций дока в Антверпене, цементных печей в Бельгии, сосудов высокого давления во Франции и Англии, котлов паровых турбин в Шотландии, мощ-

А.Н. Корниенко, Н.А. Макаренко

**Передплата – 2020 на журнал «Автоматичне зварювання»**  
**www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as**  
**Передплатний індекс 70031**  
**(з 1948 по 2019 рр. журнал видавався під назвою «Автоматическая сварка»)**

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
990 грн.	1980 грн.	90 дол. США	180 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою бандероллю.

Передплату на журнал «Автоматичне зварювання» можна оформити безпосередньо через редакцію або по каталогам підписних агентств: ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурій» (Україна); каталог АТ «Казпочта» видання України (Казахстан); каталог зарубіжних видань «Белпочта» (Білорусь).



**Передплата – 2020 на журнал «The Paton Welding Journal»**  
**www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj**  
**Передплатний індекс 21971**

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
2400 грн.	4800 грн.	192 дол. США	384 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою бандероллю.

Журнал «Автоматичне зварювання» у повному обсязі перевидається англійською мовою під назвою «The Paton Welding Journal».

Журнали поширюються по редакційній підписці (тел. /факс: +38 (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua).



**Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів**  
**на сайті видавництва www.patonpublishinghouse.com.**

**У 2019 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2017 рр. в форматі \* .pdf.**

**Реклама в журналах «Автоматичне зварювання» та «The Paton Welding Journal»**

- Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках наступних розмірів**
- ◆ Перша сторінка обкладинки, 200×200 мм
  - ◆ Друга, третя та четверта сторінки обкладинки, 200×290 мм
  - ◆ Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки, 200×290 мм
  - ◆ Вклейка А4, 200×290 мм
  - ◆ Розворот А3, 400×290 мм
  - ◆ А5, 165×130 мм

- Вартість реклами**
- ◆ Ціна договірною
  - ◆ Передбачена система знижок
  - ◆ Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі
  - ◆ Публікується тільки профільна реклама (зварювання та споріднені технології)
  - ◆ Відповідальність за зміст рекламних матеріалів несе рекламодавець

Підписано до друку 02.10.2019. Формат 60 × 84/8. Офсетний друк.  
 Ум. друк. арк. 9,77. Обл.-вид. арк. 10,75.  
 Друк ТОВ «ДІА».

03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45..