

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

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

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

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

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

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

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

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

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

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

СОБЫТИЯ

Семинар в ИЭС им. Е. О. Патона (по результатам участия в выставке «Schweissen & Schneiden 2017»)	3
XVI Международный промышленный форум – 2017	8
Предприятие с иностранными инвестициями ООО «БИНЦЕЛЬ Украина ГмбХ» — 20 лет тернистой дорогой к успеху!	10
Посещение опытного завода сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона	12

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<i>Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В.</i> Автоматизированное проектирование состава технологического жаропрочного сплава на никелевой основе для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов	13
<i>Domanski T., Piekarska W., Kubiak M.</i> Study of properties of welded joint using dantec's ISTRА 4D systems	22

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

<i>Ковальчук Д. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.</i> Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing (Обзор)	26
<i>Брызгалов А. Г., Пекарь Е. Д., Шленский П. С., Ширков Г. Д., Будагов Ю. А., Сабиров Б. М.</i> Применение сварки взрывом для создания триметаллических переходников криомодулей линейного коллайдера	34
<i>Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А.</i> Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе	40
<i>Борз Б. В., Неклюдов И. М., Рыбальченко Н. Д., Сытин В. И., Воробьев И. А.</i> Совершенствование технологии изготовления длинномерных композиционных переходников сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т методом горячей винтовой прокатки в вакууме	46
<i>Моравецкий С. И., Царюк А. К., Вавилов А. В., Кантор А. Г.</i> Повышение ударной вязкости металла комбинированных сварных соединений легированных бейнитных сталей	52
<i>Шелягин В. Д., Лукашенко А. Г., Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В., Сиора А. В., Лукашенко Д. А., Шуба И. В.</i> Разработки в области техники и технологии лазерной сварки, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона (Обзор)	57

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Календарь выставок и конференций в 2018 г.	63
Диссертации на соискание ученой степени	65

ИНФОРМАЦИЯ

Календарь декабря	67
Программы профессиональной подготовки на 2018 г.	73

Автоматичне Зварювання

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Головний редактор **Б. Є. Патон**

ЗМІСТ події

- Семінар в ІЕЗ ім. Є. О. Патона (за результатами участі у виставці «Schweissen & Schneiden 2017»).... 3
XVI Міжнародний промисловий форум – 2017 8
Підприємство з іноземними інвестиціями ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ» – 20 років тернистою дорогою до успіху! 10
Відвідини дослідного заводу зварювального обладнання ім. Є. О. Патона 12

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. Автоматизоване проектування складу технологічного жароміцного сплаву на нікелевій основі для виготовлення суцільнолитих соплових апаратів 13
Domanski T., Piekarska W., Kubiak M. Study of properties of welded joint using dantec's ISTR 4D systems 22

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- Ковальчук Д. В., Мельник В. І., Мельник І. В., Тугай Б. А. Нові можливості адитивного виробництва з технологією xBeam 3D Metal Printing (Огляд) . 26
Бризгалін А. Г., Пекар Є. Д., Шльонський П. С., Ширков Г. Д., Будагов Ю. А., Сабіров Б. М. Застосування зварювання вибухом для створення триметалічних перехідників кріомодулів лінійного коллайдера 34
Кусков Ю. М., Соловйов В. Г., Жданов В. О. Торцеве електрошлакове наплавлення електродом великого перерізу в струмопідвідному кристалізаторі 40
Борц Б. В., Неклюдов І. М., Рибальченко Н. Д., Ситін В. І., Воробйов І. О. Удосконалення технології виготовлення довгомірних композиційних перехідників сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т методом гарячої гвинтової прокатки у вакуумі 46
Моравецький С. І., Царюк А. К., Вавілов О. В., Кантор О. Г. Підвищення ударної в'язкості металу комбінованих зварних з'єднань легованих бейнітних сталей 52
Шелягін В. Д., Лукашенко А. Г., Хаскін В. Ю., Бернацький А. В., Сіора О. В., Лукашенко Д. А., Шуба І. В. Розробки в області техніки і технології лазерного зварювання, виконані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона (Огляд) 57

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

- Календар виставок та конференцій у 2018 р. 63
Дисертації на здобуття наукового ступеня 65

ІНФОРМАЦІЯ

- Календар грудня 67
Програми професійної підготовки на 2018 р. 73

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

Адреса редакції

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

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

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

CONTENTS EVENTS

- Seminar at PWI by the results of participation in «Schweissen & Schneiden 2017» Exhibition 3
XVI International Industrial Forum – 2017 8
BINZEL Ukraine GmbH Company with foreign investment: 20 years along a thorny road to success ..10
Visit to Pilot Plant of Welding Equipment of the E. O. Paton Electric Welding Institute 12

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Gajduk S.V., Kononov V.V., Kurenkova V.V. Automated designing of heat-resistant alloy composition on nickel base for manufacture of all-cast nozzle appliances 13
Domański T., Piekarska W., Kubiak M. Study of properties of welded joint using dantec's istra 4d systems 22

INDUSTRIAL

- Kovalchuk D.V., Melnik V.I., Melnik I.V., Tugai B.A. New possibilities of additive manufacturing using xBeam 3D Metal Printing technology (Review) 26
Bryzgalin A.G., Pekar E.D., Shlensky P.S., Shirkov G.D., Budagov Yu.A., Sabirov B.M. Application of explosion welding for manufacture of trimetallic transition pieces of cryomodules of linear collider 34
Kuskov Yu.M., Solovjev V.G., Zhdanov V.A. Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-conducting mould 40
Borts B.V., Nekhlyudov I.M., Rybalchenko N.D., Sytin V.I., Vorobjov I.O. Improvement of the technology of producing extended composite transition pieces of Steel 20 – Steel 08KH18N10T made by the method of hot screw rolling in vacuum 46
Moravetsky S.I., Tsaryuk A.K., Vavilov A.V., Kantor A.G. Improvement of impact toughness of metal of combined welded joints of alloyed bainite steels 52
Shelaygin V.D., Lukashenko A.G., Khaskin V.Yu., Bernatskii A.V., Siora A.V., Lukashenko D.A., Shuba I.V. Developments in the field of laser welding equipment and technologies performed at the E.O. Paton Electric Welding Institute (Review) 57

BRIEF INFORMATION

- Calendar of exhibitions and conferences in 2018 63
Theses for a scientific degree 65

INFORMATIONS

- December Calendar 67
Professional Training Programs for 2018 73

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

Address

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

СЕМИНАР В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА (по результатам участия в выставке «Schweissen & Schneiden 2017»)

17 ноября 2017 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона состоялся технический семинар, посвященный международной выставке «Schweissen & Schneiden 2017», 25–29 сентября 2017 г., Дюссельдорф, Германия. В семинаре приняли участие руководители и ведущие специалисты подразделений Института, в том числе те, кто непосредственно работал на объединенном стенде украинских компаний, организованном Международной Ассоциацией «Сварка».

Отмеченная выставка проводится раз в четыре года и представляет участникам и посетителям полный обзор последних разработок и инноваций отрасли. Мероприятие по праву считается ключевым среди мировых промышленных выставок в области сварки и родственных технологий. Часто ее называют Сварочной олимпиадой из-за масштабности и значимости мероприятия. Посетителей и экспонентов со всех пяти континентов привлекает не только размер экспозиции, но и заслуженная репутация эффективной платформы для развития успешного бизнеса. В качестве экспонентов в ней приняли участие 1035 компаний и организаций из 41 страны (примерно 33 % экспонентов из Германии), а в качестве посетителей — около 50000 специалистов из более чем 120 стран мира. Международный характер выставки нашел свое отражение и в том, что экспозиции компаний из Кореи, Франции, Тайваня,



Выступает зам. директора ИЭС акад. И. В. Кривцун

США, Китая и Японии были представлены на объединенных стендах компаний из этих стран.

Экспозиция ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины также была представлена на объединенном стенде украинских компаний, среди которых были ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона, Каховский завод электросварочного оборудования, компании Плазма-Мастер, Стил-Ворк, Сумы-Электрод, Велтек и План-Т. На стендах выставки были представлены самостоятельно такие украинские компании, как Плазматек, Вита-Полис и Донмет.

На семинаре были заслушаны сообщения специалистов ИЭС — участников выставки по ряду направлений развития сварочного производства, которые в кратком изложении приведены ниже.



Объединенный стенд украинских компаний

Лучевые технологии и оборудование (докладчик *И. В. Кривцун*). Это направление было представлено довольно широко. Так, лазерная сварка металлов была представлена на стендах 84 компаний, лазерная резка — на 44 стендах, лазерная наплавка — на 40 стендах, лазерная пайка — на 29 стендах, и наконец, лазерная сварка пластмасс — на 21 стенде.

Лазерное оборудование для реализации указанных технологий было продемонстрировано такими хорошо известными фирмами, как IPG Laser, TRUMPF, Laserline, Coherent-ROFIN, Precitec, HIGHYAG Lasertechnologie и др. Интересно отметить, что на выставке практически не были представлены технологические газовые (CO_2) лазеры. Даже такая известная компания-производитель мощных CO_2 -лазеров, как ROFIN (совместно с Coherent) продемонстрировала только волоконный лазер с диодной накачкой мощностью 10 кВт. Широкая гамма волоконных лазеров традиционно была представлена фирмой IPG Laser. Это серия одномодовых лазеров для резки, сверления, сварки и термической обработки металлов мощностью 100 Вт...2 кВт (YLR-Series) с минимальным значением параметра пучка (< 2 мм·мрад). Были представлены две серии более мощных волоконных лазеров, специально предназначенных для 2D/3D резки металлов различных толщин, сварки и обработки материалов с высокой отражательной способностью (медные и алюминиевые сплавы) мощностью в диапазонах 1...8 и 10...15 кВт (YLS-CUT Series). Кроме того, на стенде компании IPG Laser был представлен роботизированный комплекс для лазерной сварки с использованием волоконного лазера мощностью 10 кВт.

Компания TRUMPF уже традиционно представляла комплексы оборудования для реализации различных лазерных технологий, а именно роботизированный комплекс для лазерной сварки TruLaser Weld 5000 (на основе дискового лазера мощностью 5 кВт), автоматизированный комплекс для сварки, наплавки и аддитивных технологий TruLaser Gell 3000 (на основе лазера TruDisc 3001 мощностью 3 кВт) и автоматизированный лазерный комплекс для резки и поверхностной обработки металлов TruMatic 1000 (на основе лазера мощностью 1 кВт).

Особый интерес вызвала экспозиция компании Laserline, которая представила новое поколение мощных диодных лазеров с достаточно высоким качеством пучка, что было достигнуто за счет использования специального устройства —

преобразователя пучка. Это компактные лазеры LDM Series мощностью 1...6 кВт (параметр пучка 20...100 мм·мрад), лазеры LDF Series мощностью 7...20 кВт (30...200 мм·мрад) и лазеры LDF Series с Beam Converter, мощностью 4...6 кВт с параметром пучка 4...8 мм·мрад.

Кроме лазерного оборудования компания Laserline представила широкую гамму лазерных технологий. Это лазерная сварка металлов, включая сварку алюминиевых сплавов, а также сварку разнотолщинных изделий (Tailored blanks), это пайка, закалка/термическая обработка, наплавка, аддитивные технологии и, наконец, лазерная сварка пластмасс.

Единственной компанией, которая представила лазерное оборудование на основе CO_2 -лазера, была компания JENOPTIK. Было представлено специализированное оборудование для использования в автомобильной промышленности (производство тонкостенных металлических изделий, внешних и внутренних деталей из пластика, в том числе усиленного углеволокном и др.).

Кроме лазеров и лазерных комплексов на выставке были представлены отдельные компоненты лазерного оборудования — в первую очередь, специализированные лазерные головки для реализации различных технологических процессов. Такие широко известные компании, как Precitec и HIGHYAG представили широкий спектр лазерных головок для резки, сварки, наплавки и аддитивных технологий при мощности лазерного излучения в диапазоне 6...20 кВт и длине волн 900...1060 нм (для диодных лазеров) и 1025...1080 нм (для YAG, волоконных и дисковых лазеров). Представленные образцы снабжены коллиматором пучка, транспортируемого от источника излучения по гибкому волокну, соответствующими соплами и, при необходимости, системами подачи присадочной проволоки и наплавляемого порошкового материала. Многие головки имеют возможность регулировки фокусного расстояния, а также снабжены системами сканирования пучка.

Электронно-лучевые технологии. Достаточно широко были представлены и электронно-лучевые технологии. Так, электронно-лучевая сварка была представлена на стендах 23 компаний, электронно-лучевая пайка — на стендах 5 компаний, среди которых такие широко известные, как Pro-Beam systems, Techmeta, Camdridge Vacuum Engineering и др. Промышленное электронно-лучевое оборудование было представлено только в виде проспектов ввиду его больших габаритов.

Технологии и оборудование дуговой сварки (Д. В. Коваленко, С. Ю. Максимов). Отмечены новые возможности процессов ТИГ и плазменной сварки. Например, технологиями плазменной сварки активно занимаются около 200 компаний. Инновационные подходы демонстрировали компании Fronius (процесс Arc TIG) и Kjellberg (InFocus), которые направлены на увеличение глубины проплавления при высокой производительности сварки. Компания Fronius демонстрировала еще ряд инновационных подходов, связанных с программированием дугового оборудования и совершенствованием гибридных процессов.

Вызывали интерес и источники питания для высокочастотной сварки. Их предлагают компании из Германии, Канады, Великобритании, Японии. Основные преимущества при их использовании: узкая контрагированная дуга, маленькое пятно, минимальное тепловложение и, соответственно, узкая зона термического влияния. Частота сварочного тока находится в пределах 10...20 кГц.

Для процессов плазменной сварки предлагаются источники питания таких фирм: Kjellberg, Megatronik, EWM и других. Характерно, что наиболее крупные фирмы-производители сварочного дугового оборудования предлагают роботизированные комплексы, в которых часто сочетаются комплектующие узлы различных фирм.

Определенный интерес вызвал дуговой процесс под названием D-Arc (компания OTC Daihen Europe). В этом процессе дуга «горит» непосредственно в расплаве (погруженная дуга). Это стало возможным благодаря высокоскоростному вращению импульсной дуги с частотой около 1000 Гц.

Современные источники питания. Для этого вида оборудования характерно:

- цифровое управление формой сигнала. Обеспечивается контроль дуги и сварочной ванны, отсутствие брызг, высокая производительность. Могут работать с цифровым подающим механизмом для точного управления параметрами сварки. Пригодны для автоматической и роботизированной сварки;

- точное управление импульсным током. С помощью высокоскоростных микросхем точно контролируют форму импульса тока во время сварки, чтобы гарантировать совпадение фактической формы сигнала выходного тока с необходимой;

- оптимизированные параметры импульса. Это облегчает настройку параметров сварки и обеспечивает согласованность процесса сварки для оптимизации параметров импульса, связан-

ных со средним сварочным током, путем непрерывного тестирования и сравнения с базой данных сварки;

- идеальное зажигание. Специальное четырехступенчатое управление последовательностью сварки повышает энергию во время зажигания дуги и позволяет избежать дефекта прожигания в начале сварки;

- сварочный процесс без брызг. Совместная работа высокоскоростных процессоров позволяет контролировать скорость подачи проволоки, сварочный ток и напряжение сварки, чтобы обеспечить точный контроль, таким образом достигнув результата без брызг, значительно улучшает качество и эффективность сварки;

- интеллектуальная база технологий. После оптимизации параметров импульса, необходимых для различных материалов, формируется база данных сварочных технологий. Во время фактического сварочного процесса скорость плавления сварочной проволоки контролируется путем управления амплитудой и частотой импульса;

- функция контроля длины дуги. Цифровой контроллер длины дуги выполняет постоянный мониторинг процесса дуговой сварки. При отклонении длины дуги, обнаруженном в течение доли секунды, обеспечивает постоянство длины дуги и стабильный процесс сварки.

Наплавка (А. П. Жудра). Как и на предыдущих выставках наплавка была представлена целым рядом фирм, крупнейшими из которых являются Durum verschleiss-schutz, Corodur fulldraht, Oerlikon schweibtechnik, Messer group (Германия), Welding alloys group (Англия), Special metals' welding product, Postle industries (США), Gedik welding (Турция), Cepro intrnational (Нидерланды) и др. Стенды этих фирм отличались многообразием наплавочных материалов в виде электродов, порошковых проволок, проволок сплошного сечения, лент, разнообразных типов порошков. В меньшей степени представлены детали и образцы наплавленного металла. Особо следует отметить существенное уменьшение на выставке экспозиций фирм-производителей биметаллических листов.

Такие известные фирмы как Castolin (Швейцария), Vautid и Eipa (Германия), АОА (Австралия), на долю которых приходится львиная доля производства биметаллических листов, впервые за много лет вообще не принимали участие в выставке. По этой тематике существенное развитие получила фирма Ergotem (Греция), которая рекламирует биметаллические листы максимальным размером 2000×4000 мм с толщиной наплавки до 18 мм. Традиционно широкую номенклатуру материалов



Стенд компании ПлазмаТек

для износостойкой наплавки продемонстрировала фирма Dugum (Германия), существенно укрепившая свои позиции в производстве плавящихся карбидов вольфрама с мелкими гранулами сферической формы, которые нашли широкое применение для РТА-процесса. Биметаллический лист, наплавленный этим способом композиционным сплавом с NiFe-матрицей, упрочненной сферическими карбидами вольфрама, предназначен для работы в сверхэкстремальных условиях. Наряду с плазменно-порошковой наплавкой фирма широко рекламирует лазерную наплавку с подачей в зону сварочной ванны присадочных материалов в виде порошка или порошковой проволоки. Также лазерную наплавку с подачей порошка и комплекс оборудования для этой цели рекламировали фирмы GTV verschleiss-schutz, Messer group (Германия) и ряд других.

Большой спектр материалов и технологических процессов для износостойкой наплавки деталей горнодобывающей промышленности доменного и прокатного производства было представлено на стенде фирмы Corodur fulldraht (Германия).

Отмечается большим разнообразием материалов экспозиция фирмы Oerlikon metco (США). Для термического напыления и наплавки фирма разработала порошки на базе алюминия, кобальта, никеля, меди, железа и пр. Кроме того, учитывая то обстоятельство, что фирма Woka (Германия) вошла в состав Oerlikon, представлен широкий спектр порошков на базе вольфрама: агломерированные, макрокристаллические, плавные — дробленые, плавные — сферические.

Вызывает интерес продукция фирмы Special metals welding products company, США. Это электроды, порошковая и сплошная проволока, прутки и ленты для наплавки и сварки широкой номенклатуры спецсплавов. Фирма Postle industries (США) рекламировала электроды, порошковые проволоки и порошки для износостойкой наплавки деталей в горнорудной промышленности. Фирма разработала оригинальный так называемый трубчатый свароч-

ный электрод диаметром от 6,0 до 12 мм, представляющий собой трубку, покрытую обмазкой и внутри заполненную шихтовыми материалами в виде сплавов различных карбидов. Надо полагать, что лазерная наплавка за последнее десятилетие прочно укоренилась в сварочном производстве.

Также следует отметить, что на выставке различными фирмами было представлено большое количество универсального сварочного оборудования роботизированных комплексов, полуавтоматов и источников питания. В целом выставка представляла большой интерес для специалистов. Не меньший интерес был проявлен и к стенду ИЭС им. Е. О. Патона. В частности, ряд специалистов в области наплавки проявили заинтересованность к технологии наплавки биметаллических листов порошковой лентой, микроплазменной наплавке, карбиду вольфрама сферической формы и другим разработкам Института.

Интересно мнение директора фирмы Плазма-Мастер (г. Киев) *А. И. Сома*, участника украинского стенда на выставке. По его мнению плазматроны Плазма-Мастер для плазменно-порошковой наплавки заинтересовали зарубежных специалистов, особенно те, которые предназначены для наплавки внутренних поверхностей. Были проведены переговоры по заключению контрактов на поставку оборудования в Индию, Турцию и Австралию. Есть все основания утверждать, что выпускаемое оборудование конкурентоспособно на мировом рынке.

Сварочные материалы (*А. А. Полишко*). На выставке был представлен широчайший спектр всех видов сварочных, присадочных, наплавочных материалов, материалов для резки, напыления, пайки. В этой связи характерны высказывания трех руководителей украинских компаний-производителей сварочных материалов — П. Н. Погребного (ООО «Сумы-Электрод»), Ю. Н. Омельчука (ПАО «ПлазмаТек») и А. Н. Алимова (ООО «Витаполис»).

П. Н. Погребной. Участие в выставке позволило установить контакты с потенциальными потребителями выпускаемых на предприятии материалов, познакомиться с ранее неизвестными поставщиками сырья для производства материалов и соотнести уровень производимых у себя материалов с лучшими на рынке. Электроды компании ООО «Сумы-Электрод» вполне конкурентоспособны и мы намерены прилагать усилия для продвижения их на международный рынок. На выставке проведены плодотворные переговоры с потенциальными потребителями нашей продукции из Испании,



Гибридные технологии ... наступают!



Стенд Немецкого сварочного общества



Приглашаем в Эссен в 2021 г.

Словении, Чехии, Польши, Германии и других стран Евросоюза.

А. Н. Алимов. Если компания строит долгосрочные планы, в подобных выставках надо участвовать, чтобы объективно определить свое место на рынке. При этом следует стремиться к тому, чтобы вся выпускаемая продукция соответствовала уровню ведущих мировых производителей, иначе нет смысла начинать организовывать какое-то свое производство. Сегодня в Украине есть огромный нереализованный потенциал для работы на мировом рынке сварочных материалов. Качество продукции нашего производства ничем не отличается от известных производителей, но нас просто никто не знает. Стратегия, ориентированная на выпуск продукции в соответствии со стандартами EN ISO и AWS, а не ГОСТ, является единственно верной.

Ю. Н. Омельчук. В секторе производства сварочных материалов на западном рынке четко прослеживается тенденция к сокращению доли производства покрытых электродов и расширению объемов производства проволоки сплошного сечения и порошковых проволок, особенно, малого диаметра. Это обусловлено расширением применения механизированных, автоматизированных и роботизированных процессов сварки во многих отраслях промышленности.

В заключение на семинаре было отмечено, что участие специалистов Института в крупнейшей сварочной выставке Германии было полезно и уже необходимо начинать подготовку к очередной выставке «Schweissen & Schneiden», которая состоится 13–17 сентября 2021 г. в Эссене, Германия.

Материал подготовлен
А. Т. Зельниченко и В. Н. Липодаевым



XVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

21–24 ноября 2017 г. в Международном выставочном центре в г. Киеве состоялся XVI Между-

народный промышленный форум. С 2005 г. форум входит в список ведущих мировых промышленных выставок, официально сертифицированных и признанных UFI – Всемирной ассоциацией выставочной индустрии. Он ежегодно подтверждает свой статус крупнейшего выставочного события в Украине по машиностроительной тематике.

Немного статистики:

- 337 предприятий приняли участие в мероприятии;
- 29 стран мира представили технологии и оборудование;
- 17000 кв. м. составила общая площадь экспозиции;
- 10500 специалистов посетили форум.

Международный промышленный форум включал специализированные промышленные выставки в области металлообработки, машиностроения и смежных отраслей, а также обширную программу научно-практических конференций, семинаров, презентаций участников форума.

В перечне выставок:

- Металлообработка (металлообрабатывающие технологии, оборудование)
- УкрВторТех (комиссионная техника, оборудование)
- УкрЛитье (оборудование и технологии для литейного производства)
- УкрСварка (технологии, оборудование и материалы)
- Гидравлика. Пневматика
- Подшипники (подшипники качения, скольжения, свободные детали: шарики, ролики, втулки

стяжные, технологии, оборудование и инструмент для производства подшипников)

– УкрПромАвтоматизация (автоматизация производства, автоматизированные системы управления технологическими процессами, автоматизация объектов промышленности)

– Подъемно-транспортное, складское оборудование

– Образцы, стандарты, эталоны, приборы (контрольно-измерительные приборы, лабораторное и испытательное оборудование, метрология, сертификация)

– Безопасность производства (средства защиты, безопасность рабочей зоны)

Участниками выставки стали ведущие промышленные предприятия Украины, а также компании из ближнего и дальнего зарубежья.

В экспозиции «УкрСварка» свою продукцию демонстрировали около 60 компаний, в том числе из Турции (2), Китая (2), Чехии (1), Беларуси (1), Ирландии (1), Украины (53). Среди украинских компаний в выставке приняли участие следующие предприятия и компании: Арамис, Вистек, Витаполис, Донмет, Техмаш, Зонт, Идель, Навко-Тех, Сумы Электрод, Фрониус Украина, Бинцель Украина и многие другие.

Большой интерес у посетителей и участников выставки вызвал стенд издательства ИЭС им. Е. О. Патона, на котором были представлены журналы «Автоматическая сварка», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Современная электрометаллургия», а также книги, труды конференций и тематические сборники в области сварки и родственных технологий.

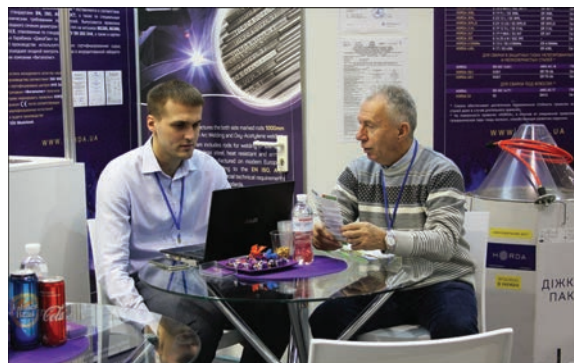
Помимо работы основных экспозиций форума на протяжении трех дней проходили научно-технические конференции, семинары и презентации. Особый интерес вызвала научно-практическая кон-



Выступление первого вице-премьер-министра Украины С. И. Кубива



Во время церемонии открытия инновационного форума



На стенде компании Витаполис



На стенде компании Бинцель Украина



На стенде компании Фрониук Украина

ференция «Современные проблемы сварочного производства», организованная Обществом сварщиков Украины, и конференция, организованная Украинским обществом неразрушающего контроля.

Подводя итоги, следует отметить активную посещаемость выставки, большое разнообразие в оформлении стендов и их содержательность. По мнению и участников выставки, и посетителей форум в 2017 г. превзошел все ожидания — явно наблюдается прогресс в области инновационных предложений экспонентов и повышенный интерес посетителей к экспозиции.

Параллельно с Промышленным форумом проходил в эти же дни II Международный форум «Innovation Market» — технологии будущего сегодня под девизом «Наука–Бизнес–Власть». Это уже вторая встреча инноваторов, отечественных и иностранных инвесторов и бизнесменов, представителей власти для объединения усилий в развитии инновационного рынка в Украине. Форум проходил под патронатом Кабинета Министров Украины и при поддержке Министерства экономического развития и торговли, МОН, НАН Украины, CSTEC — Китайского центра обмена научной и технологической информацией. Генеральным распорядителем мероприятия выступил Международный выставочный центр.

Цель форума — демонстрация лучших инноваций во всех сферах экономики Украины, поиск инвестиций для их внедрения. Форум собрал почти 220 экспонентов — университетов, НИИ, производственных фирм, Стартап-проектов Украины, а также ведущих научных учреждений и производственных фирм Китая. Среди спикеров и экспертов мероприятия такие известные имена, как Ч. Чайтхед (США) — профессор бизнес-права и директор программы «Право, технологии и предпринимательство» Корнельского университета, Г. Олсен (США) — ученый и предприниматель, третий в мире космический турист, Т. Катран (Израиль) — разработчик Стартап экосистем, и другие известные в своих сферах эксперты. В работе форума брали участие также руководители правительства Украины, ведущих министерств и профильных комитетов Верховной Рады Украины.

Особо следует отметить, что в рамках форума состоялась Китайско-Украинская научная выставка технологий и инноваций. В ней приняли участие свыше 90 ведущих научных учреждений и производственных компаний Китая, в том числе Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона. Состоялся также украинско-китайский круглый стол для молодых предпринимателей, а также форум украинско-китайского сотрудничества.

По материалам Пресс-службы МВЦ



Підприємство з іноземними інвестиціями ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ» — 20 років тернистою дорогою до успіху!

Рішення про створення в Україні дочірнього підприємства групи ABICOR BINZEL було прийняте у вересні 1997 р. Від народження шлях до становлення підприємства, яке сьогодні має високий рівень довіри та визнання на ринку зварювальної техніки України, проходив крізь низку економічних криз та соціальних потрясінь, які потрібно було подолати.

Вже наступного року після заснування компанії, у 1998 р., економіка України відчутно постраждала внаслідок впливу економічної кризи. Курс національної валюти до німецької марки змінювався щодня і був практично непередбачуваним. Саме в цей період було запропоновано діючим дилерам отримувати продукцію зі складу дочірнього підприємства, яке тим самим перебирало на себе всі курсові та інші ризики.

Десять років по тому (2008-2009 рр.) настала світова фінансова криза, що також не оминула українську економіку. Валовий внутрішній продукт (ВВП) у доларах США скоротився на 35,6 % до попереднього періоду, а національна валюта була девальвована більш ніж на 50 %.

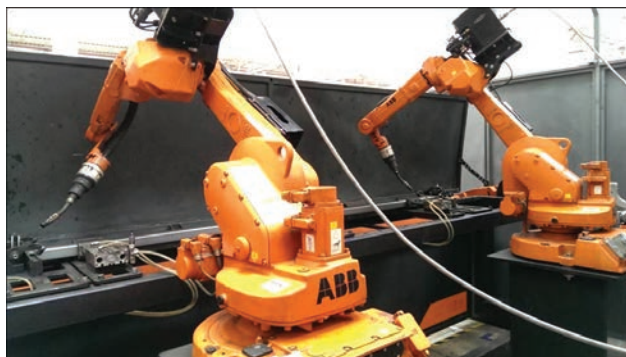
Події кінця 2013 р. (Майдан), в подальшому — анексія Криму та окупація деяких районів Східної України створили певну соціальну, політичну та економічну нестабільність в країні.



Директор компанії Ю. О. Дідус



Колектив компанії ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ»



Всі ці виклики сприяли появі особливої філософії присутності ABICOR BINZEL на ринку України. Чесність, фаховість, оперативність сервісу, прозорість умов ведення бізнесу, чітка структура мережі збуту, готовність брати на себе відповідальність були та залишаються сильними сторонами нашої компанії у сфері маркетингу високотехнологічного німецького продукту.

Зростання компанії від двох осіб у 1997 р. до 13 фахівців у 2017 р. спричинені постійно зростаючим попитом на продукцію ABICOR BINZEL. Позитивна тенденція збуту з близько 30 тис. євро у 1997 р. до 2,4 млн євро у 2007 р. підтверджується також цього року, з прогнозом у 3,2 млн євро. Таким чином, за 20 років існування компанії ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ» продажі зросли в сто разів!

Наразі, лівова частка продукції потрапляє до кінцевого споживача через мережу офіційних дилерів, яка налічує більше 150 спеціалізованих фірм, чим забезпечується оперативність постачання в регіонах. Більш ніж 30 виробників зварювального обладнання в Україні використовують комплектуючі від ABICOR BINZEL. Близько 400 кінцевих споживачів отримують продукцію безпосередньо зі складу ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ». Співпраця з усіма нашими партнерами базується на прозорості та чесності.

Центральний офіс підприємства ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ», складські приміщення, центр сервісного обслуговування знаходяться у передмісті Києва, в районі Кільцевої дороги. В березні 2017 р. ми відкрили навчально-демонстраційний центр ABISCHOOL, де поруч з останніми поколіннями комплектуючих виставлено також діючий ROBO-комплекс дугового зварювання iROB та CNC-стіл для плазмової різки металу. Протягом року було проведено більше десяти навчальних семінарів як для представників мережі дилерів, так і для навчальних закладів та кінцевих споживачів. Три наші філії з офісами у Львові, Миколаєві та Харкові забезпечують оперативну та технічну підтримку партнерів та споживачів продукції ABICOR BINZEL у регіонах.

Український ринок є відкритим за характером та дуже доступним до високотехнологічних новинок. Маючи високий рівень довіри з боку споживачів, нам вдається доволі швидко та успішно впроваджувати наші новітні розробки.

Вже здійснені реформи в країні, а також необхідність подальших перетворень та впровадження новітніх виробничих технологій викликають великий інтерес до інноваційних продуктів. Поточні інвестиції в збільшення наших демонстраційного та сервісного центрів, особливо для лінійки продуктів ROBO та Hard Automation, гарантують, що ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ» залишається і надалі компетентним та надійним партнером.

За матеріалами компанії
ПІІ ТОВ «БІНЦЕЛЬ Україна ГмбХ»

ПОСЕЩЕНИЕ ОПЫТНОГО ЗАВОДА СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

14 ноября 2017 г. Опытный завод сварочного оборудования провел презентацию новых разработок и обновленных производственных мощностей для группы ученых и специалистов Института электросварки им. Е. О. Патона. В составе группы заместители директора Института, ученый секретарь, директор ОКТБ ИЭС и др.

Сотрудничество ОЗСО с Институтом не прекращается со времени основания Завода. Как и много лет назад, ОЗСО и сегодня является пилотной площадкой для проектов Института по разработке специализированного сварочного оборудования, подтверждая на деле тезис Евгения Оскаровича Патона о важности тесной связи науки с производством.

Во время визита представители Института были ознакомлены с обновленными производственными площадями и номенклатурой выпускаемой Заводом продукции. В ходе презентации были продемонстрированы все участки производства инверторной техники, лаборатории, цеха механической обработки, кабельной продукции, мелкой и крупной пайки, а также трансформаторный цех. Делегация также посетила цех по производству классического оборудования, сервисный центр, шоу-рум, а также участок производства корпусов, укомплектованный оборудованием TRUMPF и линией порошковой покраски.



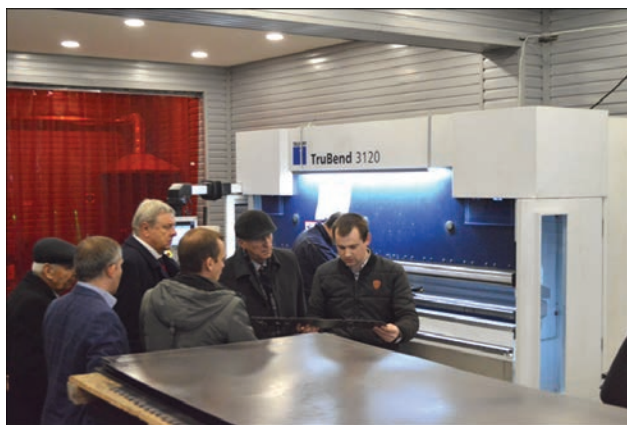
Заместитель директора ИЭС по науке Кривцун И. В., начальник инверторного цеха ОЗСО Диденко А.В., заместитель директора ИЭС по науке Кучук-Яценко С. И., Генеральный директор ОЗСО Степахно А. В., технический директор ОЗСО Токмаков М. Н., заместитель директора ИЭС по науке Лобанов Л. М., директор ОКТБ Жук Г. В., директор издательства ИЭС Зельниченко А. Т., заместитель директора ИЭС Куцак В. С.

говоров были намечены дальнейшие перспективные направления сотрудничества Завода и Института.

Во время встречи Генеральный директор ОЗСО Анат. В. Степахно отметил: «На сегодняшний день все участки Завода укомплектованы квалифицированным персоналом, современным оборудованием и готовы воплощать в жизнь проекты различной сложности. Понимая важность экономического развития страны как



В ходе визита и обсуждения направлений дальнейшего сотрудничества Завода с Институтом были отмечены положительные тенденции: увеличение производства сварочных инверторов, расширение линейки инверторов и полуавтоматов, значительное увеличение объемов экспорта. В ходе визита и состоявшихся пере-



общую задачу для всех промышленных предприятий Украины, Завод реализует программу импортозамещения на практике, — за последние два года объем выпуска сварочных инверторов увеличен почти в три раза, а доля импортных комплектующих в них снижена вдвое».

По материалам пост-релиза ОЗСО ИЭС

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧНОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНОЛИТЫХ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ

С. В. ГАЙДУК¹, В. В. КОНОНОВ¹, В. В. КУРЕНКОВА²

¹Запорожский нац. технический университет (ЗНТУ).

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: rector@zntu.edu.ua

²ООО «Патон Турбайн Текнолоджиз». 036028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: VKurenkova@patontt.com

По алгоритму разработанной комплексной расчетно-аналитической методики спроектирован новый литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЖСЗЛС-М для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов, имеющий жаропрочность $\sigma_{40}^{975} = 180...200$ МПа на уровне промышленного жаропрочного некоррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э, а также технологическую свариваемость и коррозионную стойкость на уровне промышленного свариваемого коррозионностойкого сплава ЖСЗЛС. Библиогр. 24, табл. 11, рис. 1.

Ключевые слова: литейные жаропрочные никелевые сплавы, параметры работоспособности; комплексная расчетно-аналитическая методика, регрессионная модель, регрессионное уравнение, служебные свойства; свариваемость

В настоящее время без применения новых жаропрочных материалов и технологий производства из них деталей газотурбинных двигателей (ГТД) невозможно обеспечить повышенный уровень требований к перспективным ГТД. Поэтому одним из прогрессивных направлений повышения эксплуатационных характеристик ответственных деталей ГТД является получение цельнолитых сопловых аппаратов (СА) из новых литейных коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), характеризующихся одновременно технологической свариваемостью и повышенными прочностными характеристиками [1–6].

К наиболее известным литейным ЖНС, широко применяемым для изготовления цельнолитых СА различного типа, относятся промышленные сплавы ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э. Сплав ВЖЛ12Э, легированный алюминием в количестве 5,0...5,7 мас. %, в котором объемная доля γ' -фазы достигает 58...62 %, имеет повышенную термическую стабильность структурно-фазового состава. Это обеспечивает более высокую жаропрочность и лучшее сопротивление высокотемпературной ползучести материала до 1000 °С по сравнению со сплавом ЖСЗЛС, легированным алюминием в количестве 2,4...3,0 мас. %, в котором объемная доля γ' -фазы составляет всего 38...42 %. Однако сплав ВЖЛ12Э не отличается технологической свариваемостью и необходимой коррозионной стойкостью, что делает дальнейшее его применение не особо перспективным. Указанными характеристиками отличается промышленный сплав ЖСЗЛС,

однако он не характеризуется требуемым уровнем прочности, что также ограничивает его применение для перспективных ГТД [6–11].

Следовательно, проектирование и внедрение в промышленность новых литейных коррозионностойких ЖНС, отличающихся технологической свариваемостью и повышенным уровнем жаропрочности, является актуальным, конкурентоспособным и экономически выгодным направлением для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов перспективных ГТУ с помощью разработанного экспрессного метода компьютерного проектирования, заменившего малоэффективный эмпирический метод «проб и ошибок».

Постановка задачи. Сварка/наплавка жаропрочных никелевых сплавов является довольно сложным процессом ввиду наличия в них большого количества основной упрочняющей фазы γ' — Ni_3Al (более 60 об. %). Именно выделение данной фазы в процессе кристаллизации или последующей термообработки приводит к возникновению в швах или зонах термического влияния трещин дисперсионного твердения [11].

Целью настоящей работы является проектирование с помощью разработанного экспрессного комплексного расчетно-аналитического метода (КРАМ) [12] нового литейного коррозионностойкого ЖНС для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов (СА) разных типов, отличающихся технологической свариваемостью на уровне промышленного сплава ЖСЗЛС и повышенными прочностными характеристиками на уровне несвариваемого и некоррозионностойкого промышленного сплава ВЖЛ12Э.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) промышленных литейных никелевых сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э среднего уровня легирования [6, 10]

Марка сплава	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	V	Zr	B	Ni
ЖСЗЛС	0,09	16,0	5,0	4,0	4,0	2,7	2,7	-	-	0,015	0,015	Осн.
ВЖЛ12Э	0,16	9,25	9,0	3,1	1,4	5,4	4,5	0,75	0,75	0,020	0,015	Осн.

Поиск перспективных композиций разрабатываемого сплава проводился по алгоритму компьютерного моделирования методом КРАМ на основе системы легирования промышленного литейного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, химический состав которого приведен в табл. 1 вместе с составом промышленного жаропрочного сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог.

В выбранную базовую систему легирования сплава ЖСЗЛС (Ni–Co–Cr–Al–Ti–Mo–W–Zr–B–C) вводились новые элементы, такие, как гафний и тантал, что было обусловлено следующим:

тантал и гафний способствуют увеличению объемной доли основной упрочняющей γ' -фазы и повышению ее термодинамической стабильности;

положительно влияют на морфологию карбидной фазы типа MeC, при этом заметно подавляя механизм образования менее термодинамически стабильных и неблагоприятных по морфологии карбидов типа Me₂₃C₆, что способствует повышению общего запаса пластичности материала;

способствуют значительному повышению температуры полного растворения основной упрочняющей γ' -фазы, а следовательно, увеличению ее остаточного количества при высоких температурах, что обеспечивает повышение характеристик жаропрочности, а следовательно, и длительной прочности.

Опираясь на изложенное выше, были сформулированы исходные условия для проектирования сплава в новой системе многокомпонентного легирования Ni–Co–Cr–Al–Ti–Mo–W–Ta–Hf–Zr–B–C. Ниже приведены основные контролируемые параметры, закладываемые в расчет для многокритериальной оптимизации состава разрабатываемого сплава.

Основные параметры для многокритериальной оптимизации состава проектируемого сплава:

Параметр стабильности	
$P_{\text{ТПУ}} = \%Cr / \% (Cr + Mo + W)$	$0,825 \pm 0,025$
Суммарное количество электронных вакансий в γ -тв. р-ре N_{γ}	2,40
Суммарное количество валентных электронов в γ -тв. р-ре $M_{d_{\gamma}}$	0,93
Суммарное количество валентных электронов в сплаве M_{d_C}	$0,980 \pm 0,008$
Параметр дисбаланса системы легирования ΔE	$\pm 0,04$
Суммарное содержание $\Sigma_{\gamma} = (Mo + W + Ta + Re + Ru)$, мас. %	$\geq 10,0$
Суммарное содержание $\Sigma_{\gamma'} = (Al + Ti + Nb + Ta + Hf)$, мас. %	$8,0 < \Sigma_{\gamma'} < 9,0$

Температура солидус $t_{\text{с}}$, °C	≥ 1280 °C
Температурный интервал гомогенизации, $\Delta t_{\text{гом}}$, °C	≥ 20 °C
Количество упрочняющей γ' -фазы (20 °C), $V_{\gamma'}^{20}$, об. %	$43 < V_{\gamma'}^{20} < 50$
Размерное несоответствие решеток γ - и γ' -(мисфит) δ , %	$0,15 \dots 0,45$
Предел кратковременной прочности (20 °C), $\sigma_{\text{в}}^{20}$, МПа	≥ 850
Относительное удлинение (20 °C) δ^{20} , %	$\geq 5,0$
Длительная прочность $\tau_{\text{разр}}, \sigma_{180}^{975}$, ч	≥ 40
Параметр коррозии $P_{\text{КС}} = \sqrt[3]{\%Cr \% [Ti/Al]}$	$\geq 3,0$
Критическая температура ускоренной ВТК, $t_{\text{крит}}$, °C	≥ 800
Устранение литейных дефектов на цельнолитых СА методом аргонодуговой сварки (АДС)	
..... Технологическая свариваемость	
..... на уровне сплава ЖСЗЛС	

Анализ результатов. В данной работе представлены результаты компьютерного проектирования и экспериментальных исследований нового литейного коррозионностойкого никелевого сплава, предназначенного для изготовления цельнолитых СА типа ТВ3-117 в условиях промышленного предприятия ЗМЗ им. В. И. Омельченко, имеющего повышенные прочностные характеристики и технологическую свариваемость. В отличие от более жаропрочного промышленного сплава ВЖЛ12Э, содержащего 9 мас. % Cr и не отличающегося коррозионной стойкостью, промышленный свариваемый коррозионностойкий сплав ЖСЗЛС содержит в составе большее количество хрома (16 мас. %). В свою очередь сплав ЖСЗЛС не имеет требуемый уровень жаропрочности, так как количество основной упрочняющей γ' -фазы составляет всего 38...42 %, что на 20 % меньше, чем у сплава ВЖЛ12Э (58...62)%. Поэтому, для многокритериальной оптимизации состава разрабатываемого сплава были сформулированы следующие требования и выбраны основные контролируемые параметры, закладываемые в комплексный расчет:

– выполнение условий структурной стабильности по параметрам:

$$P_{\text{ТПУ}} = \%Cr / \% (Cr + Mo + W) = 0,825 \pm 0,025;$$

$$N_{\gamma} \leq 2,40; M_{d_{\gamma}} \leq 0,93; \Delta E = \pm 0,04;$$

$$M_{d_C} = 0,980 \pm 0,008;$$

– обеспечение технологической свариваемости на уровне сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, а также прочностных характеристик, близких к уровню промышленного литейного жаропрочного сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог: контролируе-



Рис. 1. Алгоритм компьютерного расчета проектируемого сплава ЖСЗЛС-М по разработанной методике КРАМ [12]

мое количество основной упрочняющей γ' -фазы в пределах $43 < V_{\gamma'}^{20} < 50$ % (по массе); кратковременная прочность $\sigma_b^{20} \geq 850$ МПа; $\delta^{20} \geq 5,0$ % и длительная прочность $\sigma_{180}^{975} \geq 40$ ч в соответствии с ОСТ 1.90126-85;

– обеспечение коррозионной стойкости на уровне промышленного литейного коррозионно-стойкого сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип: параметр коррозии $\Pi_{KC} = \%(Ti/Al) \geq 3,0$.

Указанные выше значения характеристик для разрабатываемого сплава достигались путем многокритериальной оптимизации состава, легированного гафнием и танталом на основе промышленного сплава ЖСЗЛС с помощью алгоритма разработанного экспресс-метода КРАМ (рис. 1). К концептуально новому подходу в сбалансированности легирования литейных ЖНС можно отнести следующие подходы:

– для обеспечения работоспособности разрабатываемого сплава необходимо сбалансировать общий химический состав сплава: по γ' -образующим элементам в пределах $\sum_{\gamma'} = \%(Al+Ti+Nb+Ta+Hf) = 8...9$ мас. %; по элементам, упрочняющим γ -твердый раствор $\sum_{\gamma} = \%(Mo+W+Ta+Re+Ru) \geq 10$ мас. %;

– для обеспечения требуемого уровня прочностных характеристик необходимо повысить величину мисфит-фактора δ за счет увеличения размерного несоответствия периодов кристаллических решеток γ' -фазы и γ -твердого раствора. Это достигается введением в новую систему легирования разрабатываемого сплава оптимального количества гафния и тантала, которые положительно влияют на величину мисфит-фактора;

– введение в систему легирования проектируемого сплава оптимального количества гафния (0,3 мас. %) и тантала (2,5 мас. %) при снижении хрома с 16 до 14,5 %, а также повышении в базовой системе легирования сплава ЖСЗЛС нижней границы легирования по алюминию с 2,5 до 3,2 % и по вольфраму с 3,5 до 6,2 мас. %, а также снижение верхней границы легирования по молибдену с 4,5 до 2,5 мас. %, что обеспечит требуемый уровень технологических и коррозионных характеристик, при повышении температурного уровня прочностных характеристик.

В качестве переменных факторов для исследуемых расчетных составов были выбраны такие варьируемые легирующие элементы как гафний и тантал, а также элементы, входящие в состав базового сплава ЖСЗЛС — хром, вольфрам и молибден. Диапазон варьирования концентраций исследуемых легирующих элементов в выбранной новой системе легирования Ni–Co–Cr–Al–Ti–Mo–W–Ta–Hf–Zr–B–C задавался в следующих пределах, мас. %: 0,0...0,5 Hf; 0,0...3,5 Ta; 4,0...7,5 W; 1,0...4,0 Mo; 3,5...16,0 Cr.

Изначально в компьютерном эксперименте проводили оценку структурной стабильности расчетных составов в заданном диапазоне варьирования указанными элементами по параметрам $N_{v\gamma}$, $M_{d\gamma}$, M_{dc} и ΔE как традиционными методами по известным регрессионным уравнениям (РУ) [1–4, 6, 7, 13–20], так и по математическим регрессионным моделям (РМ) в соответствии с алгоритмом (см. рис. 1) разработанной методики КРАМ [12, 21–24].

Известно [1, 2, 14–17], что величина и знак параметра дисбаланса легирования ΔE определя-

Таблица 2. Влияние легирующих элементов базового состава промышленного сплава ЖСЗЛС на параметры его структурной стабильности

Номер состава	Содержание элементов, мас. %				Количество γ' -фазы, об. %	Мисфит, %	Параметры структурной стабильности				
	Hf	Ta	Cr	W/Mo	$V_{\gamma'}^{20}$	δ	$P_{ТПУ}$	$N_{v_{\gamma}}$	$M_{d_{\gamma}}$	M_{d_C}	ΔE
ЖСЗЛС	-	-	16,0	1,00	40,6	0,171	0,8290	2,2141	0,9100	1,0061	0,1372
1	0,1	1,5	15,5	1,83	45,9	0,290	0,8297	2,2597	0,9144	0,9857	0,0289
2	0,2	2,0	15,0	2,40	47,2	0,338	0,8309	2,2593	0,9143	0,9850	0,0250
3	0,3	2,5	14,5	3,25	48,6	0,377	0,8322	2,2566	0,9141	0,9840	0,0200
4	0,4	3,0	14,0	4,67	50,0	0,404	0,8337	2,2510	0,9134	0,9832	0,0156
5	0,5	3,5	13,5	7,50	51,3	0,412	0,8352	2,2489	0,9134	0,9824	0,0111
ВЖЛ12Э	-	-	9,25	0,45	60,8	0,151	0,8172	2,2287	0,9114	0,9847	0,0235

ет направление реакций в γ -твердом растворе и склонность жаропрочных никелевых сплавов к выделению того или иного типа ТПУ-фаз. Так, в сплавах с большим отрицательным дисбалансом легирования ($\Delta E < -0,04$) велика вероятность образования гетеротипных соединений: карбидов типа M_6C , α -фаз на основе ванадия и молибдена, а также топологически плотноупакованных типа σ -, μ -фаз. Сплавы с большим положительным дисбалансом легирования ($\Delta E > 0,04$) склонны к образованию гомеотипных соединений типа η -фазы на основе Ni_3Ti , Ni_3Nb , Ni_3Ta , а также эвтектических (перитектических) фаз на основе Ni_3Al . Если величина $\Delta E = 0$, то состав сплава считается идеально сбалансированным.

В табл. 2 представлены опытные варианты составов 1-5 проектируемого сплава вместе с составами промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э среднего уровня легирования. Композиции составов, которые удовлетворяли условиям: $P_{ТПУ} = 0,80...0,85$; $N_{v_{\gamma}} \leq 2,40$ и $M_{d_{\gamma}} \leq 0,93$; $-0,04 < \Delta E < 0,04$ и $0,972 \leq M_{d_C} \leq 0,988$, считались фазовостабильными.

Расчеты параметров структурной стабильности, таких как $N_{v_{\gamma}}$, $M_{d_{\gamma}}$, ΔE , M_{d_C} проводили путем перевода химических составов γ -твердых растворов и общих составов в ат. %.

Из табл. 2 видно, что опытные составы 1...5, а также промышленный сплав ВЖЛ12Э сбалансированы с точки зрения условий дисбаланса легирования $\Delta E = \pm 0,04$. Величина дисбаланса системы легирования ΔE в опытных составах 1...5 находится в пределах от 0,0111 до 0,0289, что удовлетворяет условиям сбалансированного легирования. Следует отметить, что величина дисбаланса системы легирования базового промышленного сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, не удовлетворяет условиям сбалансированного легирования химического состава ($\Delta E = 0,1372$). При этом сплав ЖСЗЛС технологически свариваемый, так как количество основной упрочняющей γ' -фазы соответствует ус-

ловию ($V_{\gamma'}^{20} = 40,6...50\%$), в отличие от более жаропрочного сплава ВЖЛ12Э ($V_{\gamma'}^{20} = 60,8\%$), не отличающегося технологической свариваемостью. Вместе с тем сплав ЖСЗЛС не имеет требуемый уровень жаропрочности, так как количество основной упрочняющей γ' -фазы не соответствует условию $43 \leq V_{\gamma'}^{20} \leq 50\%$.

Далее в соответствии с алгоритмом методики КРАМ (см. рис. 1) для фазово-стабильных композиций 1...4 рассчитывали структурно-фазовые, физические, температурные, коррозионные и прочностные группы параметров.

При выборе оптимальной композиции проектируемого сплава для изготовления цельнолитых СА, отличающихся технологической свариваемостью, показано, что структурная стабильность является необходимым, но недостаточным условием для достижения требуемых показателей жаропрочности. Необходимыми структурными и физическими факторами, обеспечивающими требуемый уровень жаропрочности в температурном интервале 800...1000 °С, является величина объемной доли γ' -фазы, которая должна находиться в контролируемых пределах ($43 < V_{\gamma'}^{20} < 50\%$) по массе, а также мисфит-фактор, величина которого должна находиться в пределах ($0,15 < \delta < 0,45\%$). С учетом сравнительного анализа полученных данных по группам расчетных характеристик для опытных композиций, путем многокритериальной оптимизации состава по контролируемым параметрам для дальнейших экспериментальных исследований был выбран опытный состав 3 (см. табл. 2), с присвоенным обозначением марки ЖСЗЛС-М.

Экспериментальные исследования осуществлялись на опытных образцах тестовых плавок по заданным параметрам в соответствии с табл. 2.

Оптимизированный состав спроектированного сплава ЖСЗЛС-М был следующим, мас. %: 0,10 С; 14,5 Cr; 4,5 Co; 3,0 Al; 3,0 Ti;

Таблица 3. Параметры структурной стабильности сплава ЖСЗЛС-М [21]

Метод расчета	Параметры структурной стабильности				
	$P_{\text{ПУ}} = 0,825 \pm 0,025$	$N_{\gamma} \leq 2,40$	$M_{d_{\gamma}} \leq 0,93$	$\Delta E = \pm 0,04$	$M_{d_C} = 0,980 \pm 0,008$
РУ	-	2,1945	0,9049	0,0200	0,9692
РМ	0,8323	2,2566	0,9141	0,0200	0,9840

Таблица 4. Значения структурно-фазовых параметров сплава ЖСЗЛС-М [24]

Тип фазы	Количество фазы, об. %		CALPHAD-метод [24]											
			Расчетный химический состав фаз при 20 °С, мас. %											
	Эксперимент	Расчет	C	Co	Cr	Al	Ti	Mo	W	Ta	Hf	Zr	B	Ni
γ-	49,3...48,15	48,94	-	7,95	25,3	0,38	0,06	1,4	5,67	0,14	-	-	-	59,1
γ'-	48,5...49,5	48,6	-	1,67	1,88	5,83	6,12	0,13	4,11	5,01	0,62	0,03	-	74,6
МС	0,95...1,05	1,03	10,1	-	0,63	-	25,8	0,49	9,75	37,9	15,1	0,23	-	-
M ₂₃ C ₆	1,25...1,30	1,25	5,16	0,77	71,7	-	-	18,1	1,43	-	-	-	-	2,84
M ₃ B ₂	Не выявлено	0,18	-	-	20,7	-	-	69,5	1,65	-	-	-	8,15	-

Таблица 5. Значения физических параметров сплава ЖСЗЛС-М

Сплав ЖСЗЛС-М	Физические параметры при 20 °С [24]								
	ρ	E	$\alpha \cdot 10^6$	C_p	$r \cdot 10^6$	λ	$a_{\gamma} \cdot 10^{-4}$	$a_{\gamma'} \cdot 10^{-4}$	δ
Ед. измер.	г/см³	ГПа	1/К	Дж/(г·К)	Ом·м	Вт/м·К	мкм	мкм	%
CALPHAD	8,47	213,25	11,46	0,42	0,71	10,29	3,589	3,575	0,377

Примечание. ρ – удельная плотность; E – модуль упругости Юнга; α – коэффициент термического расширения; C_p – удельная теплоемкость; r – удельное электросопротивление; λ – теплопроводность; a_γ – параметр кристаллической решетки γ'-фазы; a_{γ'} – параметр кристаллической решетки γ-твердого раствора; δ – размерное несоответствие параметров решеток (мисфит).

Таблица 6. Температурные параметры сплава ЖСЗЛС-М [12, 22]

Метод оценки	Σ _γ	t _L	t _S	Σ _{γ'}	t _{эвт.}	T _{н.р.} ^{γ'}	t _{н.р.} ^{γ'}	Δt _{кр}	Δt _{гом}	t _{гом}
Расчет по РМ	11,0	1370	1286	8,8	1243	845	1176	84	67	-
Эксперимент	-	1355	1290	-	1220	-	1160	65	60	1190

Примечание. Σ_γ – суммарное содержание элементов, упрочняющих γ – твердый раствор; Σ_{γ'} – суммарное содержание элементов, стабилизирующих γ'-фазу; t_L – температура ликвидус; t_S – температура солидус; t_{эвт.} – температура локального плавления эвтектической γ'-фазы; t_{н.р.}^{γ'}, t_{п.р.}^{γ'} – температуры начала и полного (конца) растворения γ'-фазы; Δt_{кр} – интервал кристаллизации сплава; Δt_{гом} – температурный интервал для проведения гомогенизации; t_{гом} – оптимальная температура гомогенизации для сплава.

6,5 W; 2,0 Mo; 2,5 Ta; 0,3 Hf; 0,015 Zr; 0,015 B; Ni — основа.

Для сравнительной оценки склонности к структурной и фазовой нестабильности оптимизированного состава спроектированного сплава ЖСЗЛС-М использовали как традиционные расчетные методы PHACOMP (N_γ) [7, 11], New PHACOMP (M_d) [13], ΔE-метод [14–17] с их известными регрессионными уравнениями (РУ), так и полученные математические регрессионные модели (РМ) [12, 21–24] (табл. 3).

На основе критериев (параметров) работоспособности литейных ЖНС, обоснованных в работах [12, 21–24], были проведены расчеты методом CALPHAD [25] по структурно-фазовым и физическим параметрам [24, 26]. В табл. 4 и 5 представлены расчетные значения структурно-фазовых и физических параметров для спроектированного сплава ЖСЗЛС-М оптимального уровня легирования.

В табл.6 представлены расчетные и экспериментальные значения, которые были получены методом дифференциального термического анализа (ДТА) на установке ВДТА-8М в среде гелия при постоянной скорости нагрева (охлаждения), равной 80 °С/мин. В качестве эталона использовался термически инертный образец чистого вольфрама (W-эталон). Технология калибровки по температурам плавления чистых металлов позволила получить хорошо воспроизводимые результаты, независимо от скорости нагрева.

Комплекс сравнительных экспериментальных исследований проводился на опытных образцах тестовых плавок из спроектированного сплава ЖСЗЛС-М в сравнении с аналогичными образцами промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э. Опытные образцы из спроектированного сплава

Т а б л и ц а 7. Характеристики коррозии сплава ЖСЗЛС-М [12, 23]

Метод оценки	$V_q^t, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$					
	$\Pi_{\text{КС}} \geq 3,0$	$V_q^{800} \cdot 10^{-3}$	$V_q^{850} \cdot 10^{-3}$	$V_q^{900} \cdot 10^{-3}$	$V_q^{950} \cdot 10^{-3}$	$t_{\text{крит}}, ^\circ\text{C}$
Расчет по РМ	3,81	0,0483	0,9719	3,5846	6,0234	817
Эксперимент	-	0,04	0,90	3,50	5,90	820

ва ЖСЗЛС-М получали вакуумно-индукционной плавкой на установке марки УППФ-3М по серийной технологии.

Расчетные исследования ВТК-стойкости проводили для состава спроектированного сплава ЖСЗЛС-М (табл. 4) для синтетической золы при температурах испытаний 800, 850, 900 и 950 °С на базе 100 ч по полученным математическим РМ для данной группы параметров [12, 23]. Экспериментальные исследования ВТК-стойкости образцов тестовой плавки сплава ЖСЗЛС-М проводили в синтетической золе при температурах испытаний 800, 850, 900 и 950 °С, в сравнении со сплавами ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э по методике, разработанной Никитиным В. И. (ЦКТИ им. И. И. Ползунова), широко применяемой в отрасли [8–10]. Испытания при всех температурах проводили в течение 100 ч. Стойкость образцов опытных составов к ВТК оценивали по средней скорости коррозии $V_q^t, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. В табл. 7 представлены расчетные и экспериментальные значения коррозионных параметров спроектированного сплава ЖСЗЛС-М.

Механические испытания проводили на стандартных цилиндрических образцах из разработанного сплава ЖСЗЛС-М на кратковременную и длительную прочность стандартными методами. Испытания на кратковременную прочность проводили при температурах 20, 800, 900 и 1000 °С на разрывных машинах УМЭ-10ТМ и ГСМ-20 (ГОСТ 1497-61, ГОСТ 9651-73, ГОСТ 1497-84). Испытания на длительную прочность проводили при температурах 800, 900, 975 и 1000 °С на машинах АИМА-5-2 и ZTZ 3/3 (ГОСТ 10145-81). Количество γ' -фазы в сплаве ЖСЗЛС-М представлено в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Количество γ' -фазы в сплаве ЖСЗЛС-М, об. % [12, 24]

Метод оценки	$V_{\gamma'}^{20}$	$V_{\gamma'}^{800}$	$V_{\gamma'}^{900}$	$V_{\gamma'}^{1000}$
Расчет по РМ	48,6	47,5	44,6	33,9
Эксперимент	48,9	-	-	-

Т а б л и ц а 9. Характеристики кратковременной прочности сплава ЖСЗЛС-М, МПа [12, 24]

Сплав ЖСЗЛС-М	σ_B^{20}	σ_B^{800}	σ_B^{900}	σ_B^{1000}	δ^{20}	δ^{800}	δ^{900}	δ^{1000}
Расчет по РМ	979	835	860	502	-	-	-	-
Эксперимент	930...975	811...836	849...854	500...563	8,8...13,2	3,8...5,3	2,9...5,9	5,0...11,8

Т а б л и ц а 10. Предел длительной прочности (100 и 1000 ч) сплава ЖСЗЛС-М, МПа [12, 24]

Сплав ЖСЗЛС-М	σ_{100}^{800}	σ_{1000}^{800}	σ_{100}^{900}	σ_{1000}^{900}	σ_{100}^{1000}	Σ_{1000}^{1000}
Расчет по РМ	480	370	280	180	120	70
Эксперимент	480...500	350...370	280...300	170...190	110...130	70...80

В табл. 9, 10 представлены расчетные и экспериментальные значения пределов кратковременной и длительной прочности образцов тестовых плавок спроектированного сплава ЖСЗЛС-М при разных температурах.

В табл. 11 представлены сравнительные результаты расчетных и экспериментальных значений характеристик спроектированного сплава ЖСЗЛС-М по группам параметров: структурная стабильность, структурно-фазовые, физические, температурные, коррозионные и прочностные характеристики, в сравнении со значениями аналогичных характеристик промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э.

В результате многокритериальной оптимизации состава на основе расчетных и экспериментальных исследований для заданных условий проектирования установлено, что разработанный сплав ЖСЗЛС-М обеспечивает необходимый уровень требуемых параметров и характеристик. Сбалансированный состав с указанными пределами легирования содержит оптимальное количество тантала — $2,5 \pm 0,3$ мас. %; более низкое содержание хрома — $14,5 \pm 0,3$ мас. %, молибдена — $2,0 \pm 0,5$ мас. % и более высокое содержание вольфрама — $6,5 \pm 0,3$ мас. %, чем у промышленного сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип; более низкое содержание алюминия — $3,3 \pm 0,3$ %, чем у сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог.

В условиях промышленного производства АО «Мотор Сич» по прочностным характеристикам аттестовано 5 плавов общей массой 500 кг из разработанного сплава ЖСЗЛС-М. В промышленных условиях предприятия ЗМЗ им. В. И. Омельченко по серийной технологии изготовлены опытные цельнолитые сопловые аппараты СА ТВ3-117. Отработан технологический процесс по устранению литейных дефектов методом АДС. Опытный СА ТВ3-117 поставлен на технологический двигатель, где отработал ресурс с положительным результатом и до насто-

Таблица 11. Сравнительные значения характеристик сплавов

Характеристики параметров по группам	Значения характеристик сплавов		
	Сплав-прототип ЖСЗЛС	Спроектированный сплав ЖСЗЛС-М	Сплав-аналог ВЖЛ12Э
Параметры структурной стабильности			
$P_{ТПУ} = 0,825 \pm 0,025$ $N_{\gamma} \leq 2,40$ $M_{d\gamma} \leq 0,93$ $M_{dC} = 0,980 \pm 0,008$ $\Delta E = \pm 0,04$	0,8290 2,2141 0,9100 1,0061 0,1372	0,8323 2,2566 0,9141 0,9840 0,0200	0,8175 2,2287 0,9114 0,9847 0,0235
Структурно-фазовые параметры			
$43 \leq V_{\gamma} \leq 50 \text{ \% (об \%)}$	38,0...42,0	43,5...49,5	58,0...62,0
Физические параметры			
$\rho, \text{ г/см}^3$ мисфит $0,15 \leq \delta \leq 0,45 \text{ \%}$	8,33 0,171	8,47 0,377	7,93 0,151
Температуры характеристические			
$t_L, ^\circ\text{C}$ $t_S \leq 1280, ^\circ\text{C}$ $\Delta t_{кр}, ^\circ\text{C}$ $T_{эвт}, ^\circ\text{C}$ $T_{\gamma}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{н.р.}\gamma}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{п.р.}}, ^\circ\text{C}$ $\Delta t_{гом}, ^\circ\text{C}$ $T_{гом}, ^\circ\text{C}$	1354 1260 94 1188 835 1090 98 1150 $\pm$ 10	1355 1290 65 1220 850 1160 60 1190 $\pm$ 10	1334 1273 61 1229 851 1222 7 без ТО
Параметры коррозионной стойкости			
$P_{КС} \cdot 3,0$ $V^{800} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$ $V^{850} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$ $V^{900} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$ $V^{950} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$ $t_{крит}, ^\circ\text{C}$	4,00 0,04 0,82 3,07 5,24 825	3,81 0,05 0,97 3,58 5,92 820	2,53 0,16 2,98 9,97 15,12 770
Механические параметры			
Кратковременная прочность: $\sigma_B^{20} \geq 850 \text{ МПа}$ $\sigma_B^{800}, \text{ МПа}$ $\sigma_B^{900}, \text{ МПа}$ $\sigma_B^{1000}, \text{ МПа}$	740...70 620...650 520...600 -	930...975 911...956 849...854 500...563	910...975 880...1000 850...870 500...580
Длительная прочность $\sigma_{100}^{800}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{800}, \text{ МПа}$ $\sigma_{100}^{900}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{900}, \text{ МПа}$ $\sigma_{100}^{1000}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{1000}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{975} \geq 40 \text{ ч}$ σ_{180}	380...400 - 180...200 - - - - -	480...500 350...370 280...300 170...90 110...130 70...80 44...68	480...530 370...420 270...305 180...205 120...145 75...90 68...127
Устранение литейных дефектов на цельнолитых СА методом АДС	Отличается технологической свариваемостью	Отличается технологической свариваемостью	Не отличается технологической свариваемостью

ящего времени продолжает работать с целью увеличения назначенного ресурса.

Выводы

1. Путем многокритериальной оптимизации состава по алгоритму разработанной методики КРАМ спроектирован новый литейный свариваемый коррозионностойкий сплав ЖСЗЛС-М для изготовления цельнолитых СА разных типов, отличающийся повышенными прочностными характеристиками на уровне жаропрочного несварива-

емого и некоррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э, а также характеризующийся коррозионной стойкостью и технологической свариваемостью на уровне промышленного литейного свариваемого коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС.

2. Разработанный новый сплав ЖСЗЛС-М внедрен в промышленное производство АО «Мотор Сич» для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов типа ТВ3-117 разных ступеней взамен широко применяемых промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. (2006) Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина: *Науч.-техн. сб.: к 100-летию со дня рождения С. Т. Кишкина*. Е. Н. Каблов (ред.). Москва, Наука.
2. Каблов Е. Н. (2007) 75 лет. Авиационные материалы. *Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный научно-технический сборник*. Е. Н. Каблов (ред.) Москва, ВИАМ.
3. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др. (1997) *Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение.
4. Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. (1987) *Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе*. Москва, Машиностроение.
5. Патон Б. Е., Строганов Г. Б., Кишкин С. Т. и др. (1987) *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления*. Киев, Наукова думка.
6. Каблов Е. Н. (2001) *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)*. Москва, МИСИС.
7. Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К. (1995) *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок*; пер. с англ. в 2-х кн. Р. Е. Шалин (ред.). Москва, Металлургия.
8. Коваль А. Д., Беликов С. Б., Санчугов Е. Л., Андриенко А. Г. (1990) *Научные основы легирования жаропрочных никелевых сплавов, стойких против высокотемпературной коррозии (ВТК)*. Запорож. машиностр. ин-т. (Препринт).
9. Никитин В. И. (1987) *Коррозия и защита лопаток газовых турбин*. Ленинград, Машиностроение.
10. Химушин Ф. Ф. (1969) *Жаропрочные сплавы*. Москва, Металлургия.
11. Du Pont J. N., Lippold J. C., Kiser S. D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. New Jersey, pp. 298–326.
12. Гайдук С. В. (2015) Комплексная расчетно-аналитическая методика для проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **2**, 92–103.
13. Morinaga M., Yukawa N., Adachi H., Ezaki H. (1984) New PHACOMP and its application to alloy design. *Superalloys*, AIME, pp. 523–532.
14. Морозова Г. И. (2012) Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **2** (690), 52–56.
15. Морозова Г. И. (1993) Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов. *Металлы*, **1**, 38–41.
16. Гайдук С. В., Тихомирова Т. В. (2015) Применение аналитических методов для расчета химического состава γ -, γ' -фаз и параметров фазовой стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Авиационно-космическая техника и технология*, **9**, 33–37.
17. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. (2015) Получение прогнозирующих математических моделей для расчета термодинамических параметров литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Современная электрометаллургия*, **4**, 31–37.
18. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. (2016) Регрессионные модели для прогнозирующих расчетов коррозионных параметров литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Там же*, **3**, 51–56.
19. Гайдук С. В., Тихомирова Т. В. (2015) Применение CALPHAD-метода для расчета количества γ' -фазы и прогнозирования длительной прочности литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Металлургическая и горно-рудная промышленность*, **6**, 64–68.
20. Saunders N., Fahrman M., Small C. J. (2000) The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys. *Superalloys 2000*. pp. 803–811.
21. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. (2015) Расчет фазового состава литейного жаропрочного коррозионно-стойкого никелевого сплава методом CALPHAD. *Современная электрометаллургия*, **3**, 35–40.
22. Вертоградский В. А., Рыкова Т. П. (1984) *Исследование фазовых превращений в сплавах типа ЖС методом ДТА. Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. Москва, Наука, сс. 223–227.
23. Гайдук С. В., Баликов С. Б., Кононов В. В. (2004) О влиянии тантала на характеристические точки жаропрочных никелевых сплавов. *Вестник двигателестроения*, **3**, 99–102.
24. Гайдук С. В., Петрик И. А., Кононов В. В. (2015) Сравнительные исследования свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 82–88.

References

1. Kablov, E.N. (2006) Cast high-temperature alloys. S.T. Kishkin effect. In: *Transact. to 100th Anniversary of S.T. Kishkin*. Ed. by Kablov. Moscow, Nauka [in Russian].
2. Kablov, E.N. (2007) 75 years. Aviation materials. *Selected works of VIAM: Jubilee Scient.-Techn. Transact.* Ed. by E.N. Kablov. Moscow, VIAM [in Russian].
3. Shalin, R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B. et al. (1997) *Single crystals of nickel high-temperature alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Kishkin, S.T., Stroganov, G.B., Logunov, A.V. (1987) *Cast high-temperature nickel-base alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Paton, B.E., Stroganov, G.B., Kishkin, S.T. et al. (1987) *High-temperature strength of cast nickel alloys and their protection from oxidation*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Kablov, E.N. (2001) *Cast blades of gas-turbine engines (alloys, technology, coatings): State Scientific Center of Russian Federation*. Moscow, MISIS [in Russian].
7. Sims, Ch.T., Stoloff, N.S., Hagel, U.K. (1995) *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power units*. Ed. by R.E. Shalin. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Koval, A.D., Belikov, S.B., Sanchugov, E.L., Andrienko, A.G. (1990) *Scientific basics of alloying of high-temperature nickel alloys resistant to high-temperature corrosion (HTC)*. Zaporozhye Machine Building Institute [in Russian].
9. Nikitin, V.I. (1987) *Corrosion and protection of gas turbine blades*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
10. Khimushin, F.F. (1969) *High-temperature alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Du Pont, J.N., Lippold, J.C., Kiser, S.D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. New Jersey, 298–326.
12. Gajduk, S.V. (2015) Complex calculated-analytical procedure for design of cast high-temperature nickel-base alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 92–103 [in Russian].
13. Morinaga, M., Yukawa, N., Adachi, H., Ezaki, H. (1984) New PHACOMP and its application to alloy design. *Superalloys*, AIME, 523–532.
14. Morozova, G.I. (2012) Compensation of disbalance of alloying of high-temperature nickel alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **12**, 52–56 [in Russian].
15. Morozova, G.I. (1993) Balanced alloying of high-temperature nickel alloys. *Metally*, **1**, 38–41 [in Russian].
16. Gajduk, S.V., Tikhomirova, T.V. (2015) Application of analytical methods for calculation of chemical composition of γ -, γ' -phases and parameters of phase stability of cast high-temperature nickel-base alloys. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, **9**(126), 33–37 [in Russian].
17. Gajduk, S.V., Kononov, V.V., Kurenkova, V.V. (2015) Construction of predictive mathematical models for calculation of thermodynamical parameters of cast high-temperature nickel alloys. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 31–37 [in Russian].
18. Gajduk, S.V., Kononov, V.V., Kurenkova, V.V. (2016) Regression models for predictive calculations of corrosion parameters of cast high-temperature nickel alloys, *Ibid.*, **3**, 51–56 [in Russian].
19. Gajduk, S.V., Tikhomirova, T.V. (2015) Application of CALPHAD- method for calculation of γ' -phase and

- prediction of long-term strength of cast high-temperature nickel alloys, *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **6**, 64-68 [in Russian].
20. Saunders, N., Fahrman, M., Small, C.J. (2000) The application of CALPHAD calculations to Ni-based superalloys. In: *Superalloys 2000*. TMS, Warrendale, 803-811.
 21. Gajduk, S.V., Kononov, V.V., Kurenkova, V.V. (2015) Calculation of phase composition of cast high-temperature corrosion-resistant nickel alloy by CALPHAD method. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 35-40 [in Russian].
 22. Vertogradsky, V.A., Rykova, T.P. (1984) *Investigation of phase transformations in alloys of high-temperature type by DTA method*. In: High-temperature and heat-resistant nickel-base steels and alloys. Moscow, Nauka, 223-227.
 23. Gajduk, S.V., Belikov, S.B., Kononov, V.V. (2004) About influence of tantalum on characteristic points of high-temperature nickel alloys. *Vestnik Dvigateloostroeniya*, **3**, 99-102.
 24. Gajduk, S.V., Petrik, I.A., Kononov, V.V. (2015) Comparative investigations of weldability of cast high-temperature nickel alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 82-88 [in Russian].

С. В. Гайдук¹, В. В. Кононов¹, В. В. Куренкова²

¹Запорізький нац. технічний університет (ЗНТУ).
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

E-mail: rector@zntu.edu.ua

²ООО «Патон Турбайн Текнолоджіз».
036028, м. Київ, вул. Ракетна, 26.
E-mail: VKurenkova@patontt.com

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ НА НІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦІЛЬНОЛИТИХ СОПЛОВИХ АПАРАТІВ

За алгоритмом розробленої комплексної розрахунково-аналітичної методики спроектований новий ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав ЖСЗЛС-М для виготовлення цільнолитих соплових апаратів, що має жароміцність

$\sigma_{40}^{975} = 180...200$ МПа на рівні промислового жароміцного некорозійностійкого сплаву ВЖЛ12Е, а також технологічну зварюваність і корозійну стійкість на рівні промислового зварюваного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС. Бібліогр. 24, табл. 11, рис. 1.

Ключові слова: ливарні жароміцні нікелеві сплави, параметри працездатності; комплексна розрахунково-аналітична методика, регресійна модель, регресійне рівняння, службові властивості; зварюваність

S. V. Gajduk¹, V. V. Kononov¹, V. V. Kurenkova²

¹Zaporozhye National Technical University.
64 Zhukovsky Str., 69063, Zaporozhye.

E-mail: rector@zntu.edu.ua

²LCC «Paton Turbine Technologies».
26 Raketnaya Str. 630028, Kyiv.
E-mail: VKurenkova@patontt.com

AUTOMATED DESIGNING OF HEAT-RESISTANT ALLOY COMPOSITION ON NICKEL BASE FOR MANUFACTURE OF ALL-CAST NOZZLE APPLIANCES

According to the algorithm of a comprehensive analytical solution method (CASM), a new high-temperature corrosion-resistant nickel-base cast alloy ZMI-ZU-M1 has been developed for manufacture of turbine blades by the method of a directional (mono-) crystallization. The developed alloy is characterized by the corrosion resistance at the level of the industrial corrosion-resistant alloy ZMI-ZU, having the improved high-temperature properties ($\sigma_{40}^{975} = 260$ MPa) at the level of the aircraft high-temperature nickel-base cast alloy ZhS26 VI with the directed crystallization. 27 Ref., 11 Tabl., 2 Fig.

Keywords: high-temperature nickel-base cast alloys; performance parameters; CASM-technique; regression model; regression equation; service properties; weldability

Поступила в редакцію 22.11.2017

Возможности

ГОРИЗОНТ 2020: ГРАНТОВАЯ ПРОГРАММА ЕС ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ И ИННОВАЦИЯМ

Программа оказывает поддержку широкому спектру деятельности: от научных исследований до демонстрационных проектов и инноваций, готовых к выходу на рынок.

По ссылке можно найти календарь основных открытых конкурсов на 2018-2019 гг.:

http://www.zabala.co.uk/sites/default/files/documentos/publicaciones/zabala17_h2020_deadlines_2018-2019.pdf



STUDY OF PROPERTIES OF WELDED JOINT USING DANTEC'S ISTR 4D SYSTEMS*

T. DOMAŃSKI, W. PIEKARSKA, M. KUBIAK

Czestochowa University of Technology, Generala I. N. Dabrowskiego 69, 42-201, Czestochowa, Poland

E-mail: domanski@imipkm.pcz.pl

The paper presents displacement and strain fields measured at various stages of tension of flat samples in order to compare the effect of different technological parameters on mechanical properties of welded joints. Results of measurements are also compared with the results of tensile test of the base material to determine the impact of welding process on changes of mechanical properties of tested steel. The measurement of displacements and strains in tensed flat specimens made of S355 steel, hybrid welded using electric arc and laser beam is in the scope of this work. Welding process is performed using Yb:YAG laser and electric arc in GMAW method. D70 Trumpf laser head with maximum power up to 12 kW is used in welding tests with a spot diameter of the laser beam $d=0.8$ mm. Welded joints are made for different technological parameters of the process with laser beam heat source leading in the tandem. Tension tests of flat samples are performed in accordance with norm PN-EN ISO 6892-1. Dantec Q-400 ISTR multi-camera 3D correlation system is used for strain and displacement measurements. The method of measurement is based on the correlation of digital images recorded by the three cameras. Surface of tested samples is covered with a layer of white and black paint. The measurement took place by tracking movements of spots covering the surface of the sample, loaded by longitudinal force. 6 Ref., 4 Fig.

Keywords: hybrid welding, electric arc, laser, welded joints, mechanical properties, tensile tests, deformation fields

Introduction

Today's facilities are characterized by high functional diversity, which, while maintaining high quality of workmanship, is very difficult. Products are increasingly demanding, and consequently products have increasingly complex 3D geometry. Measurement tools should combine the speed of collection of measurement points with high accuracy. The use of a non-invasive measurement method makes it possible to detect defects much faster without the need for specialist preparation of test specimens [1-3].

Coupled thermal, structural and mechanical phenomena occurring in welding process have a direct impact on the quality of welded joint. The material in the weld and adjacent region is heated to various temperatures resulting in a variety of structures that occur in the joint and heat affected zone (HAZ), having different mechanical properties in comparison to base material. Theoretical and experimental analysis of mechanical behaviour of welded joint is still one of the fundamental industrial problems. In the welding process using a laser beam a high welding speeds are obtained with a good quality of welds and a narrow thermal influence zone which is helpful in increasing the quality and mechanical properties of the joint as well as the production efficiency. One of the modern welding technologies is laser-arc hybrid welding, which combines laser beam

welding with classical electric arc welding cooperating in a single process. This method has many advantages in comparison to welding process with electric arc or laser beam heat sources used separately. Advantages of laser-arc hybrid welding process include higher welding stability, higher melting efficiency, easier input of additional material to the welding pool and a lower input power under the same welding penetration.

The investigations about laser-arc hybrid welded steel have been reported widely and applied successfully in a wide range of the industry. These studies include analytical modeling of thermomechanical phenomena occurring in the process and experimental research on plasma formation, liquid material flow through the welding pool, microstructure composition as well as the analysis of welding deformations and mechanical properties of welded joints, performed in both destructive and nondestructive tests. One of usually performed tests on welded joints is the classical tension test. The standard for this type of testing is the norm PN-EN ISO 6892-1. This test allows the determination of basic mechanical properties of welded joints. However, the development in new measurement systems, such as 3D multicamera correlation system allows the analysis of deformations at the surface area of tensed sample in control area determined for cameras used in the experiment. The knowledge about strain distribution in the joint combined with the analysis of the microstructure of welded joint is essential in determining the material properties in separate joint zones, like the weld, HAZ and transition zone.

* On the materials of the VIII International conference «Beam Technologies in Welding and Materials Processing», 11–15 September 2017, Odessa.

Moreover, the results of such studies are an excellent base for verification of developed theoretical models.

Considering above facts, the main objective of this study are experimental studies on strain during tension of samples welded by laser-arc hybrid technology using GMAW method and Yb:YAG laser beam. Dantec Q-400 Istra multi-camera 3D correlation system is used to measure the distribution of strains during performed tests made on the base material and welded joint. Presented results include tension diagrams as well as a comparison of strain fields measured for the entire tension cycle.

Experimental set-up, hybrid welding

Laser beam emitted by D70 Trumpf laser head with maximum power up to 12 kW is used with electric arc in GMAW method (Fig. 1). Laser head is equipped with collimator lens having a focal length $f_c=200$ mm, and a focusing lens with a focal length $f=400$ mm. The diameter of the beam is set by changing the optical fiber supplying the laser beam to the head. Optical fiber is used in the research having a diameter 0.4 mm. For used optical system double magnification is achieved giving laser focus diameter $d=0.8$ mm. Butt welding is performed for sheets

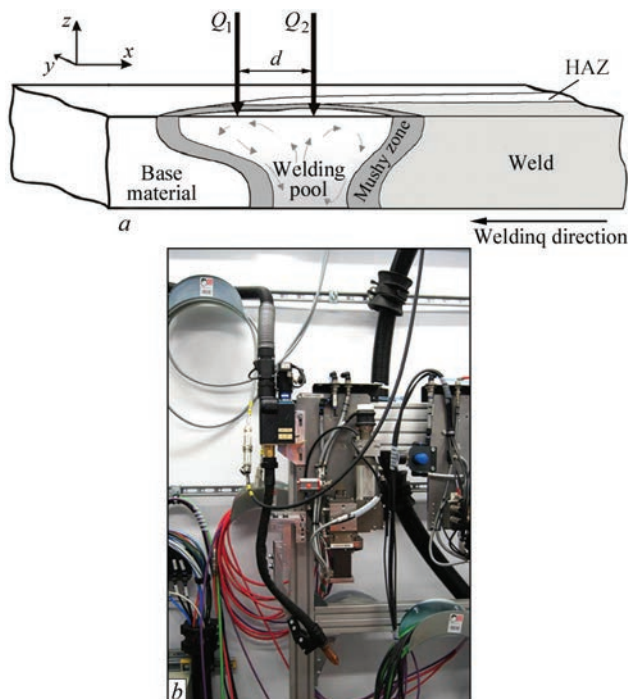


Fig. 1. Scheme of hybrid welding process (a); hybrid laser head Yb: YAG + MIG (b)

made of S355 steel. Welding process proceed without a gap in the shielding gas 82% Ar + 18% CO₂, the gas flow is 18 l/min, wire speed 6m/min and welding speed set to $v=1$ m/min. The distance between heat sources $d=2$ mm. Laser beam is the leading heat source in the tandem.

Samples are welded in the system with leading laser beam in the tandem as well as in inversed system with leading arc. Laser beam power is set to $Q=3$ kW, arc voltage $U=19$ V and current $I=190$ A in the welding experiment.

Strain measurement system

Samples for the tension test were made from welded joints according to norm PN-EN ISO 6892-1. Universal strength machine Zwick&Roel Z100 is used with extensometer Multisens in all performed tension tests. The accuracy of the strength machine is up to 0,1N in force and 1 μ m in displacement. Universal strength machine cooperates with Dantec Q-400 Istra multi-camera 3D correlation system [4-6]. Measurement system is composed of optical cameras used to record strains or deformations. The Timing Box is an interface between the control computer and the sensors for synchronization and analog recording of data, and to power-up cameras and PC computer with a number of network cards, allowing for the introduction of signals from cameras and different sources, transmitted via ethernet and installed dedicated Istra4D software.

In the experiment the system of three cameras was used. Cameras are mounted on the beam which

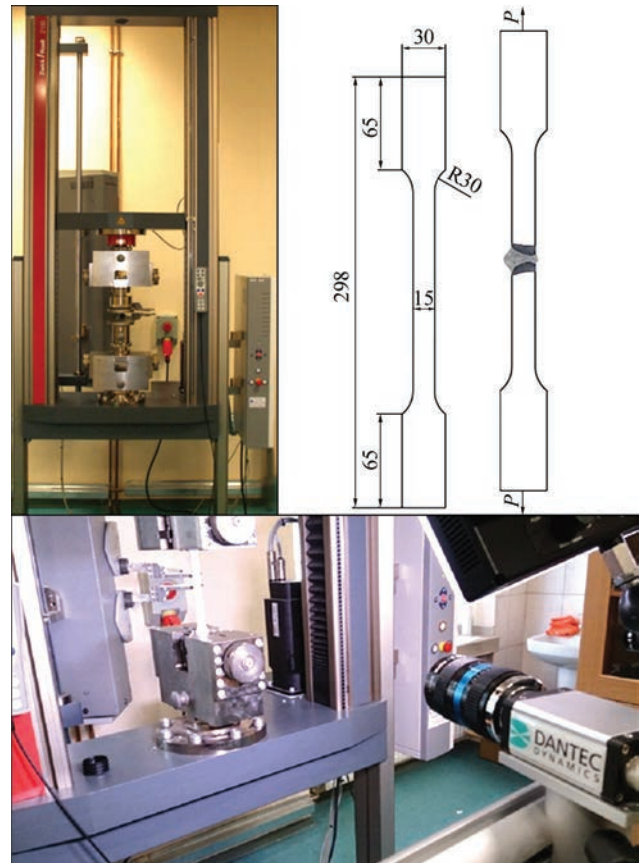


Fig. 2. Tension test: universal strength machine Zwick&Roel Z100, dimension of samples used in the test, Q-400 Istra multi-camera 3D

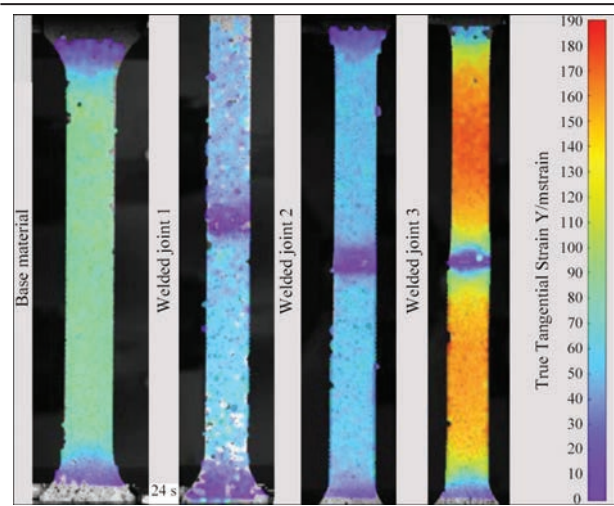


Fig. 3. Strain fields in tensed base material and welded joint ($t=24$ [s])

is supported by two fully adjustable tripods. Optical cameras used to record strains and deformations are equipped with 50 mm, mod: 670 mm lenses and have maximum resolution 4.19 Megapixels, 29 Hz each. This allowed determining the full size of analyzed sample in the working area of universal testing machine. Strain fields are measured for the entire tension cycle. Trigger mechanism is created in Istra4D software for the measurement. Pictures are made for every time increment $\Delta t=0.4$ s.

Results and discussion, strain distributions

Figure 3 presents comparison of strain fields in tensed base material and welded joint at the various measurement steps in elasto-plastic range as well as before the rupture-during the formation of the neck. It can be observed that the weld and HAZ has a significantly lower strain compared to the base material.

Distribution of strain ϵ_y along the length of tensed sample (55 mm in both direction from the center point of the sample) is illustrated in Fig. 4. Strain distribution is shown in the central axis y for the base material and welded joint at different times. Visible decrease of strain is present in the joint where HAZ is present. The slight increase of strain in the weld can be because of the inaccurate selection of an additional material in GMAW method.

The comparison of strain ϵ_y at time $t=24$ s is presented in Fig. 4c. It can be observed that for the base material higher values of strain ϵ_y are present in comparison to welded joint.

Conclusions

The use of multi-camera 3D correlation system allowed the analysis of strain and deformation for the selected material points, lines or plane throughout

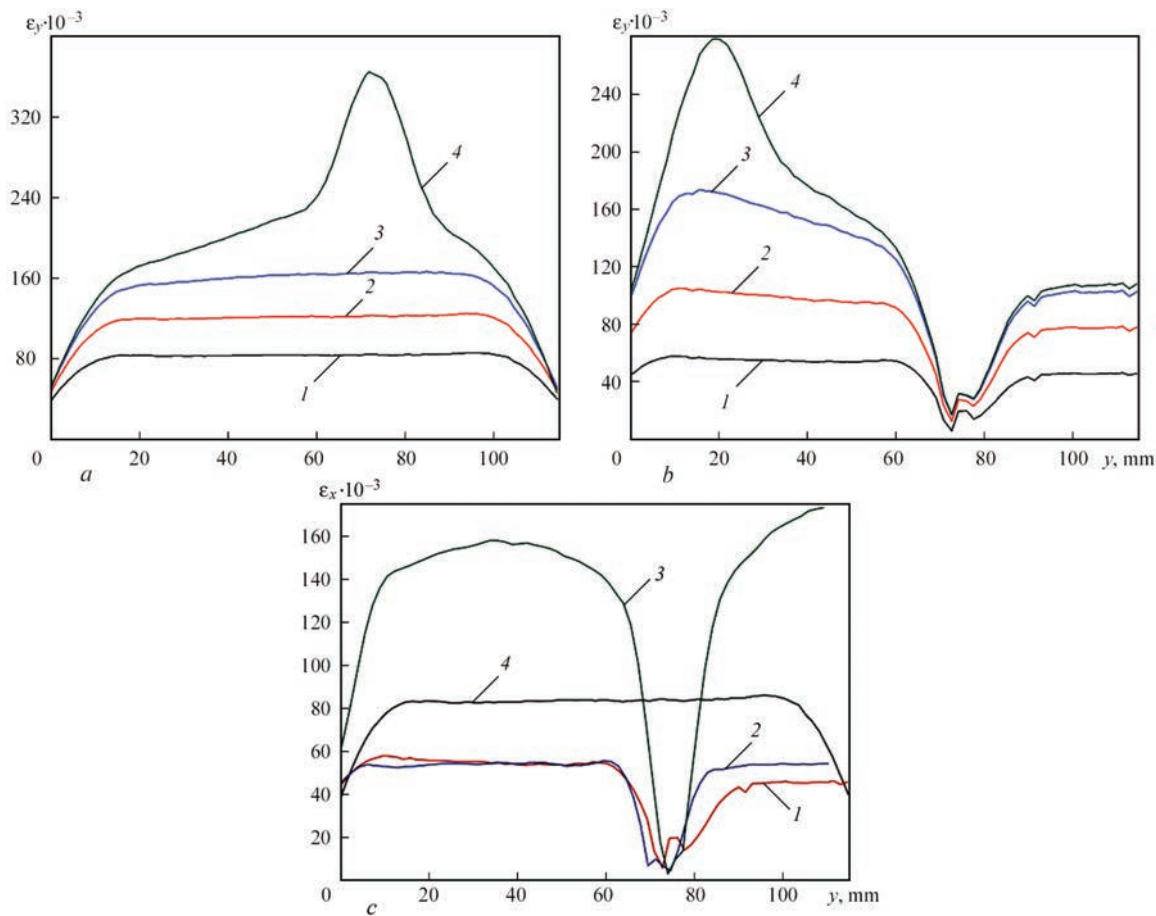


Fig. 4. Distribution of strain ϵ_y in the central axis y of sample for different times of tension: a — the base material; b — welded joint; c — comparison for time $t=24$ s (for a, b: 1 — 24s, 2 — 28, 3 — 32, 4 — 39; for c: 1-3 — welded joint 1-3; 4 — base material)

the measuring sample. Use of the system allowed the analysis of deformation and strain distributions in the weld and heat affected zone during tension test. It can be observed that lower strains occur in heat affected zone in comparison to the base material which in reference to pictures of microstructure confirm partial hardening of this zone. Visible increase of strain ϵ_y in the weld may be due to the inaccurate selection of an additional material in GMAW method. Obtained results allowed for a thorough analysis of mechanical properties separate zones of the joint and do not limit the tensile test to determine the global strength and plastic properties of welded material. Obtained experimental results may be very helpful in verifying mathematical and numerical models of thermomechanical phenomena occurring in welding processes.

References

1. Patorski K. (2005) *Interferometria laserowa*, Oficyna wydawnicza politechniki Warszawskiej.
2. C. Herbst, K. Splitthof. Basic of 3D Digital Image Correlation, Ulm, Dantec Dynamics GmbH.
3. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A, Peters W.H. (1985) Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3), 232-244.
4. Gower M.R., Shaw R.M. (2010) Towards a planar cruciform specimen for biaxial characterization of polymer matrix composites. *Applied Mechanics and Materials*, 24-25, 115-120.
5. Lord J.D., Digital image correlation (DIC) (2009) *Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques*, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 14-15.
6. Palanca M., Cristofolini L. *Validation and optimization of the parameters of acquisition and processing for analysis through digital image correlation*. University of Bologna.

Доманский Т., Пекарска В., Кубиак М.

Університет технологій в Ченстохові.
ул. Генерала Яна Дабровські 69,
42-201, Ченстохов, Польща
E-mail: domanski@imipkm.pcz.pl

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМ ISTRA 4D КОМПАНИИ DANTEC

Рассмотрен характер смещения и поля деформации, которые были измерены на различных стадиях растяжения плоских образцов с целью сравнения влияния различных технологических параметров на механические свойства сварных соединений. Результаты измерений также сравниваются с результатами испытания на растяжение основного материала, позволяющие оценить влияние процесса сварки на изменения механических свойств испытанной стали. Представлены данные смещений и деформаций в плоских сварных образцах из стали S355, выполненных гибридной сваркой с использованием электрической дуги и лазерного пучка. Процесс сварки выполнялся Yb:YAG лазером и электрической дугой при дуговой сварке металлическим электродом в защитном

газе. В сварочных испытаниях использовалась лазерная головка D70 Trumpf максимальной мощностью до 12 кВт и диаметром пятна лазерного пучка $d = 0,8$ мм. Сварные соединения были выполнены для различных технологических параметров процесса. Испытания на растяжение плоских образцов выполняли в соответствии с нормами PN-EN ISO 6891-1. Многокамерная корреляционная 3D система Dantec Q-400 ISTRA использована для измерения деформаций и смещений. Метод измерения основывается на корреляции цифровых изображений, записанных при помощи трех камер. Поверхность испытанных образцов покрывали слоем белой и черной краски. Измерение проводили посредством следа за перемещением за точками, которые покрывают поверхность образца, нагруженного продольным усилием. Библиогр. 6, рис. 4.

Ключевые слова: гибридная сварка, электрическая дуга, лазер, сварные соединения, механические свойства, испытания на растяжение, поля деформации

Доманський Т., Пекарська В., Кубіак М.

Університет технологій в Ченстохові.
вул. Генерала Яна Дабровські 69,
42-201, Ченстохова, Польща
E-mail: domanski@imipkm.pcz.pl

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ ISTRA 4D КОМПАНІЇ DANTEC

Розглянуто характер зміщення і поля деформації, які були виміряні на різних стадіях розтягування плоских зразків з метою порівняння впливу різних технологічних параметрів на механічні властивості зварних з'єднань. Результати вимірювань також порівнюються з результатами випробування на розтягнення основного матеріалу, що дозволяють оцінити вплив процесу зварювання на зміни механічних властивостей випробуваної сталі. Представлені дані зсувів і деформацій в плоских зварних зразках зі сталі S355, виконаних гібридним зварюванням з використанням електричної дуги і лазерного пучка. Процес зварювання виконувався Yb:YAG лазером і електричною дугою при дуговому зварюванні металевим електродом в захисному газі. У зварювальних випробуваннях було розроблено лазерну голівку D70 Trumpf максимальною потужністю до 12 кВт і діаметром плями лазерного пучка $d = 0,8$ мм. Зварні з'єднання були виконані для різних технологічних параметрів процесу. Випробування на розтяг плоских зразків виконували відповідно до норм PN-EN ISO 6891-1. Багатокамерна кореляційна 3D система Dantec Q-400 ISTRA використана для вимірювання деформацій і зсувів. Метод вимірювання ґрунтується на кореляції цифрових зображень, записаних за допомогою трьох камер. Поверхні випробуваних зразків покривали шаром білої і чорної фарби. Вимірювання проводили за допомогою стеження за переміщенням точок, які покривають поверхню зразка, навантаженого поздовжнім зусиллям. Бібліогр. 6, рис. 4.

Ключові слова: гібридне зварювання, електрична дуга, лазер, зварні з'єднання, механічні властивості, випробування на розтягування, поля деформації

Поступила в редакцию 10.11.2017

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ТЕХНОЛОГИЕЙ xBeam 3D Metal Printing (Обзор)*

Д. В. КОВАЛЬЧУК, В. И. МЕЛЬНИК, И. В. МЕЛЬНИК, Б. А. ТУГАЙ

ЧАО «НВО «Червона Хвиля». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 15.

E-mail: dv_kovalchuk@yahoo.com

Новая технология под названием xBeam 3D Metal Printing разработана ЧАО «НВО «Червона Хвиля» для решения наиболее важных технических и экономических проблем существующих методов аддитивного производства. Она основана на применении профильного электронного луча в качестве источника нагрева и использовании проволоки в качестве расходного материала. Ключевым элементом нового технического решения является специальная низковольтная газоразрядная электронная пушка, в которую вдоль оси встроена направляющая для подачи расходной проволоки. Уникальный полый конический электронный луч, генерируемый такой пушкой, создает исключительные физические условия для расплавления расходного материала и его послойного осаждения, что обеспечивает не только возможности точно контролируемого и повторяемого производства изделий, но и открывает возможности создания новых технологий и материалов. К настоящему времени технология xBeam 3D Metal Printing успешно прошла проверку в лабораторных и практических условиях на экспериментальном xBeam 3D-принтере. Библиогр. 16, рис. 13.

Ключевые слова: электронный луч, газоразрядные электронно-лучевые пушки, аддитивное производство металлов, 3D печать металлов

Аддитивное производство (Additive Manufacturing) в течение последнего десятилетия стало одним из важнейших направлений развития мировой промышленности. Технологии аддитивного производства открывают возможности быстрого и точного изготовления изделий по индивидуальным требованиям заказчика, что является давней мечтой любого производителя. Благодаря этой уникальной способности аддитивное производство, наряду с роботизацией и информационными технологиями, даже называют третьей промышленной революцией [1–3].

Аддитивное производство определяют как процесс изготовления изделия согласно трехмерной модели путем послойного соединения материалов с помощью автоматического компьютерного управления (CAD/CAM). Технологии аддитивного производства также называют промышленной 3D печатью, а оборудование для их реализации 3D-принтерами [4–6].

Особенное значение имеет аддитивное производство изделий из металлов, так как именно металлы по-прежнему являются основным промышленным конструкционным материалом [7].

К настоящему времени разработан целый ряд различных технологий аддитивного производства металлов, различающихся по:

– расходному материалу — порошок, проволока или порошок в смеси со связующим веществом;

– источнику нагрева — лазер, электронный луч, плазма, электрическая дуга и т. п.;

– методу формирования слоев — выборочное расплавление (спекание) подготовленного слоя порошка (powder bed), прямое осаждение порошка или проволоки на предыдущий слой («direct energy deposition») или инъекционное литье (binder jetting) [4, 5, 8].

Но, несмотря на постоянные исследования и многочисленные эксперименты, разработанные к настоящему времени технологии аддитивного производства по-прежнему имеют ряд недостатков, сдерживающих их широкое внедрение в промышленность. Среди основных недостатков разработанных к настоящему времени аддитивных технологий можно выделить следующие [9, 10]:

- сложное и дорогое оборудование;
- дорогие исходные материалы;
- ограниченные размеры изготавливаемых трехмерных изделий и низкая производительность (для технологий с использованием порошка в качестве исходного материала);
- толстые стенки изделий и грубая поверхность изготавливаемых трехмерных изделий (для технологий с использованием проволоки в качестве исходного материала);
- остаточная пористость, неравномерная структура, остаточные напряжения и деформации;
- необходимость в дополнительных операциях;

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

– сложное управление, требующее высококвалифицированных кадров.

Все это в итоге приводит к высокой себестоимости изделий, что резко ограничивает действительно широкое распространение аддитивных технологий в мировом промышленном производстве [11].

Специалистами ЧАО «НВО «Червона Хвиля» разработан новый способ изготовления трехмерных объектов и устройство для его реализации [12], в котором изделие формируется путем послойного осаждения на основу расходуемого материала, подаваемого в зону осаждения, перемещаемую по заданной траектории, там расплавляется с помощью электронного луча и потом затвердевает по мере выхода из зоны нагрева, образуя наплавленный слой материала. Источником нагрева в указанном способе и устройстве является газоразрядная электронно-лучевая пушка с кольцевым катодом, непосредственно генерирующая электронный луч в форме полого перевернутого конуса.

Новая технология, получившая название xBeam 3D Metal Printing, согласно общепринятой классификации различных типов аддитивных технологий относится к процессам прямого осаждения (direct energy deposition), в которых сфокусированная тепловая энергия используется для расплавления материалов при их осаждении [4, 5].

Технология xBeam 3D Metal Printing по мнению как разработчиков, так и ряда экспертов в области аддитивного производства, способна решить многие технические и технологические проблемы существующих аддитивных технологий, прежде всего устранить противоречие между точностью изготовления и высокой производительностью, и обеспечить за счет этого кардинальное снижение себестоимости производства трехмерных металлических изделий.

В основе разработки нового способа лежит уникальная способность газоразрядных электронно-лучевых пушек генерировать профильные электронные пучки путем прямой эмиссии из катода без применения дополнительных отклоняющих и фокусирующих средств [13]. Также для реализации указанной технологии и достижения положительных технологических и экономических эффектов важны другие характерные возможности газоразрядных электронно-лучевых пушек, такие как способность стабильно работать в широком диапазоне остаточных давлений в рабочей камере ($10^{-2} \dots 10$ Па), в том числе в парциальном давлении различных газов, способность генерировать и формировать электронный луч при относительно невысоком ускоряющем напряжении (от 5 кВ), простая и компактная конструкция, удобное обслуживание, долгий срок служ-

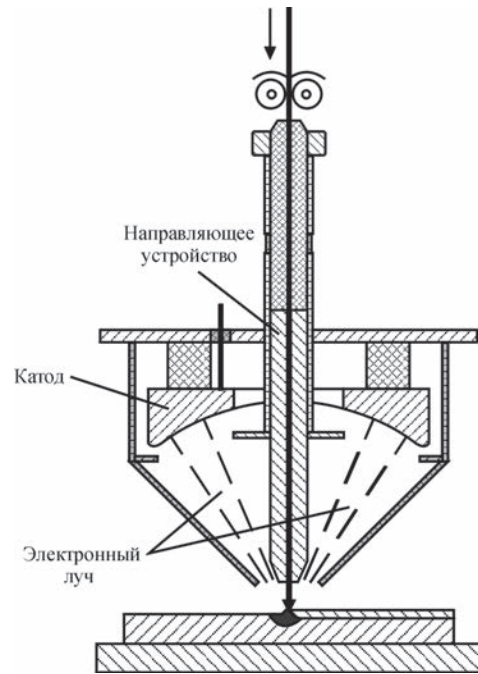


Рис. 1. Схема устройства для реализации технологии xBeam 3D Metal Printing

бы катода, простое и гибкое управление технологическими параметрами.

Основными отличительными признаками способа и устройства, лежащими в основе технологии xBeam 3D Metal Printing, являются следующие:

- для создания ванны расплава на подложке и расплавления расходуемого материала используется электронный луч в форме полого перевернутого конуса, генерируемый специальной газоразрядной электронно-лучевой пушкой;

- расходуемый материал в виде проволоки подается через направляющее устройство точно в центр ванны расплава на подложке соосно с указанным полым коническим электронным лучом;

- указанные специальная газоразрядная электронная пушка и направляющее устройство для подачи расходуемого материала объединены в один общий технологический модуль (рис. 1).

Указанная конфигурация электронного луча, взаимное расположение этого луча и подаваемого расходуемого материала по отношению к подложке создают ряд критически важных физических и металлургических условий осаждения расплавленного материала и образования наплавленного валика, и тем самым в результате обеспечивается контролируемое формирование очередного слоя с определенными геометрическими параметрами и требуемой структурой осажденного материала. В первую очередь необходимо отметить следующие технологические особенности xBeam 3D Metal Printing.

Круглая форма ванны расплава и вертикальная подача расходуемого материала точно в центр ванны расплава (рис. 2) обеспечивают отсутствие затененных зон на подложке (что предотвраща-

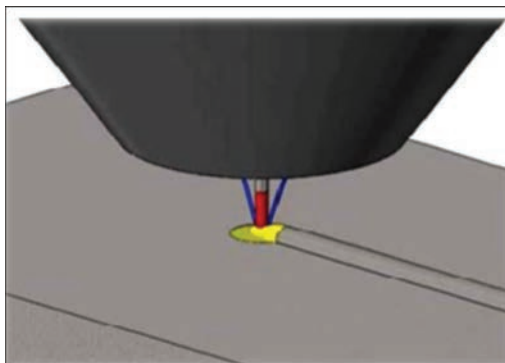


Рис. 2. Схематическое изображение процесса осаждения

ет возникновение пористости и несплавлений в осажденных слоях), возможность формирования валика шириной, лишь слегка превышающей диаметр расходуемой проволоки (что позволяет изготавливать изделия с тонкими и точными стенками), общий высокий КПД процесса за счет эффективного использования всей мощности, подаваемой в зону осаждения.

Такая осесимметричная конфигурация тепловых потоков и массопереноса значительно упрощает математическое моделирование процесса, что очень важно для улучшения управления технологическими операциями с целью получения заданных свойств материала [14].

Расходуемый материал полностью охватывается точно и гибко регулируемым потоком энергии (рис. 3), что обеспечивает абсолютно осесимметричный и равномерный предварительный подогрев и контролируемое расплавление расходного материала. Важно подчеркнуть, что полая конфигурация луча, получаемая без применения сканирования, обеспечивает действительно постоянно равномерный нагрев как проволоки, так и подложки. Это свойство, кроме всего, открывает также интересные технологические возможности, например, использование сложных вариантов расходного материала, таких как порошковая проволока или связка из нескольких проволок различных материалов.

Неразрывный стационарный массоперенос жидкого металла с конца оплавленной расходо-

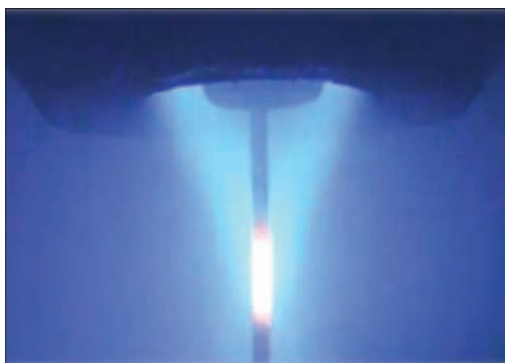


Рис. 3. Воздействие полого конического электронного луча на расходную проволоку

мой проволоки на подложку надежно удерживается силами поверхностного натяжения (рис. 4). Как только жидкий металл, образующийся на конце подаваемой проволоки, касается жидкого металла в ванне на подложке, происходит немедленное образование перешейка между концом проволоки и подложкой, удерживаемого силами поверхностного натяжения, по которому происходит плавное и равномерное перетекание жидкого металла на подложку, на скорость которого также влияет сила всемирного тяготения. Жидкий металл, достигший подложки, немедленно растекается в пределах границ существующей в данный момент времени ванны расплава, которая определяется границами зоны воздействия электронного луча на подложку, за счет полной адгезии между однородными жидкостями. Как только жидкий металл достигает твердого металла на подложке, он немедленно затвердевает. Таким образом реализуется надежный и в то же время гибкий механизм формирования наплавленного валика заданной ширины, и, соответственно, толщины стенки изготавливаемого трехмерного изделия.

Отдельно стоит отметить, что указанное свойство неразрывного массопереноса жидкого металла с конца проволоки на подложку обеспечивает реализуемость технологии xBeam 3D Metal Printing в условиях невесомости, так как силы поверхностного натяжения там действуют так же, как и на Земле. Потребность в аддитивном производстве металлических деталей в условиях невесомости на борту космических аппаратов, а также в миссиях по освоению Луны и Марса, постоянно подчеркивается в планах соответствующих организаций и компаний, таких как NASA, ESA, SpaceX и других [15, 16].

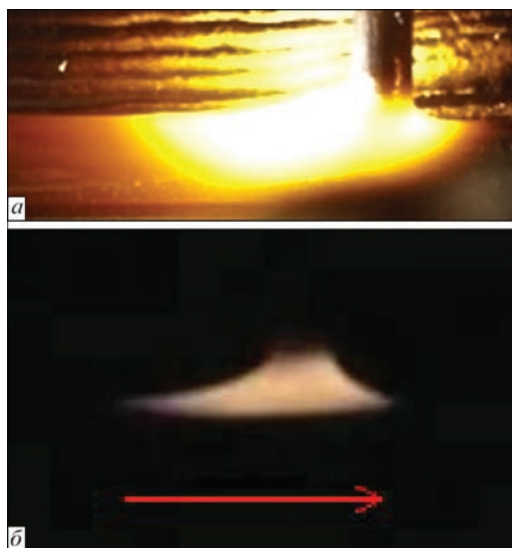


Рис. 4. Растекание жидкого металла с конца проволоки по подложке: а — прямая фотосъемка, б — фотосъемка через темное стекло

Чрезвычайно важным свойством технологии xBeam 3D Metal Printing является существенно меньшая концентрация мощности источника нагрева, электронного луча, генерируемого низковольтной газоразрядной электронно-лучевой пушкой, по сравнению с источниками нагрева всех других известных в настоящее время процессов аддитивного производства металлов. Как правило, разработчики 3D-принтеров по металлу в качестве источников нагрева применяют устройства (электронно-лучевые пушки термоионного типа, лазеры, плазмотроны), разработанные для реализации процессов сварки, где минимально возможный фокус (как правило от десятков до сотен микрон) и высокая концентрация мощности (до $10^5 \dots 10^7$ кВт/см²) являются важными технологическими параметрами. В аддитивном производстве чрезмерная концентрация мощности может привести к слишком глубокому проплавлению предыдущих слоев вплоть до образования дефектов в изделии. Поэтому мощность высокой концентрации приходится распределять по поверхности за счет сканирования с высокой частотой, что, во-первых, является сложной технической задачей, а во-вторых, нарушает непрерывность процесса формирования осажденного слоя.

Специальная газоразрядная электронно-лучевая пушка, разработанная для реализации технологии xBeam 3D Metal Printing, генерирует электронный

луч при низком ускоряющем напряжении до 20 кВ, что при уровне мощности до 20 кВт и минимальном фокусе диаметром около 1,5 мм обеспечивает очень мягкий и плавный нагрев обрабатываемых поверхностей без применения сканирования, при этом концентрация мощности в фокусе электронного луча не превышает 10^3 кВт/см².

Воздействие такого луча на поверхность позволяет образовывать на ней весьма мелкую ванну расплава, достаточную лишь для создания условий растекания поступающего жидкого металла в пределах жидкой фазы на поверхности и минимально воздействующую на материал подложки.

Поддержание мелкой ванны расплава на подложке в процессе осаждения (рис. 5) обеспечивает более высокую скорость охлаждения и быструю кристаллизацию расплавленного материала подложки и наплавленного материала, благодаря чему достигается лучшая структура полученного металла.

Меньшее количество материала, пребывающего в жидкой фазе в единицу времени, существенно снижает потери легирующих элементов из-за испарения, что особенно актуально для многих сплавов титана, ниобия и других тугоплавких металлов. Так, исследования изменения химического состава титанового сплава Ti-6Al-4V в процессе осаждения по технологии xBeam 3D Metal Printing показали незначительное снижение содержания алюминия с 5,91 % в исходной проволоке до 5,72...5,79 % (в зависимости от параметров процесса) в осажденном материале.

Сниженная концентрация мощности на поверхности осаждения существенно уменьшает температурные градиенты на подложке и в наплавленных ранее слоях, что обеспечивает уменьшение остаточных напряжений и деформаций.

Для демонстрации положительного эффекта, обеспечиваемого применением низковольтного электронного луча, был проведен эксперимент, в котором в качестве подложки вместо традиционной толстой плиты использовалась проволока, концы которой закреплялись струбцинами. В качестве наплавленного материала использовалась проволока из титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 3 мм, в качестве подложки — проволока диаметром 3,2 мм из титана BT1-00.

Установленная мощность электронно-лучевой пушки составляла 3 кВт при ускоряющем напряжении 15 кВ. Проволоку подавали со скоростью 14 мм/с, подложку перемещали также со скоростью 14 мм/с. Предварительный прогрев подложки не применялся. В результате эксперимента была построена ровная стенка (рис. 6), по основным параметрам (ширина и высота стенки, толщина слоя) соответствующая такой же стенке, нанесенной на массивную подложку, но при этом полностью отсутствовало остаточное искривление (коробление)



Рис. 5. Макрошлиф металла зоны термического влияния при осаждении проволоки: а — из титана BT1-0 диаметром 1,6 мм на плиту из титана BT1-0; б — из титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 3,0 мм на плиту из сплава Ti-6Al-4V

подложки, что практически неизбежно при использовании массивной плиты [14].

Использование этого свойства может быть весьма эффективным в случае построения изделия, в котором базовая плита не является его частью и должна быть полностью удалена механической обработкой.

Важной особенностью технологии xBeam 3D Metal Printing является небольшое количество базовых параметров процесса и простота управления ими, что крайне важно для надежного обеспечения повторяемости и повышения общей эффективности производства. Основными параметрами процесса являются:

- мощность электронно-лучевой пушки;
- величина зазора Z между выходным отверстием для проволоки и подложкой (рис. 7);
- скорость подачи расходуемой проволоки;
- линейная скорость перемещения подложки (зоны осаждения).

Имеется в виду, что в одном процессе используется проволока одного диаметра.

Ключевым параметром, определяющим основные характеристики процесса формирования трехмерного изделия, является именно зазор Z между выходным отверстием для проволоки и подложкой.

Величина зазора Z определяет распределение мощности электронного луча между расходуемой проволокой и подложкой, а также ширину зоны воздействия электронного луча на подложку (т. е. ширину ванны расплава на подложке), практически соответствующую ширине наплавляемого валика. Таким образом, при постоянной мощности электронного луча поддержание стабильной величины зазора Z обеспечивает стабильную скорость осаждения, т. е. постоянную производительность процесса осаждения.

Важным достоинством технологии является то, что стабильность этого ключевого параметра процесса обеспечивается простым соблюдением постоянной геометрической конфигурации компонентов оборудования, что легко реализуется механическими средствами и также легко контролируется.

Далее, при постоянных мощности электронного луча и зазора Z , т. е. при постоянной производительности осаждения и ширине получаемого наплавочного валика, высота осаждаемого слоя может меняться путем изменения линейной скорости перемещения подложки, так как при этом то же количество поступающего жидкого металла будет распределяться на другой площади прямо пропорционально изменению линейной скорости перемещения подложки.

На рис. 8 показаны стенки с разными параметрами осажденных слоев, сформированные из проволоки одинакового диаметра.



Рис. 6. Образец, полученный с использованием проволоки в качестве подложки для осаждения: *a* — вид сбоку; *b* — сверху; *c* — снизу

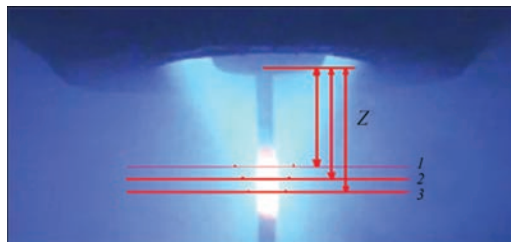


Рис. 7. Зазор Z между выходным отверстием для проволоки и подложкой



Рис. 8. Стенки, сформированные из проволоки диаметром 2 мм: *a* — нержавеющая сталь 304L, толщина слоя 0,6 мм; *b* — титановый сплав Ti-6Al-4V, толщина слоя 1,2 мм

Таким образом, контроль всего нескольких простых параметров оборудования обеспечивает гибкое управление формированием трехмерного изделия и гарантирует повторяемость основных параметров осаждения каждого слоя (рис. 9).

При этом при определении полного набора управляемых параметров процесса также могут приниматься во внимание и соответствующим образом контролироваться параметры вакуума, тип рабочего газа газоразрядной электронно-лучевой пушки, температура подложки для осаждения, соотношение ускоряющего напряжения и тока луча при одной и той же мощности.

Существенным фактором выбора правильной стратегии формирования трехмерного изделия является выбор диаметра расходуемой проволоки. Технология xBeam 3D Metal Printing изначально ориентирована главным образом на использование стандартной промышленной проволоки диаметром от 1 до 3 мм. Это является важным аргументом в пользу повышения экономической

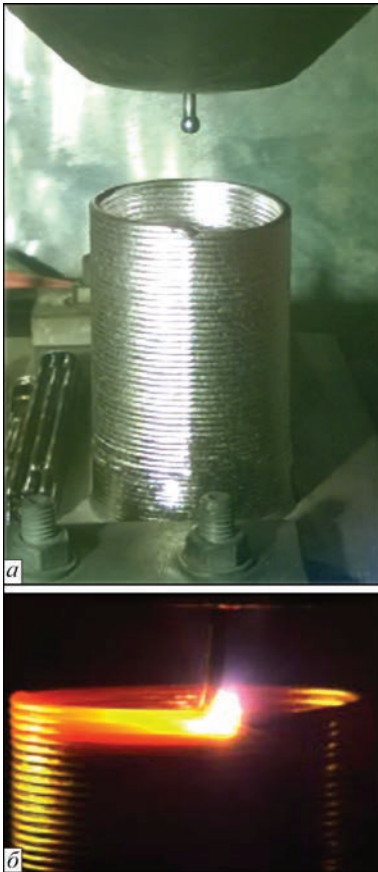


Рис. 9. Стакан из титана марки Ti-Grade 4 (а), изготовленный по технологии xBeam 3D Metal Printing (б) проволокой диаметром 3 мм, наложенной в 50 слоев с производительностью около 2,5 кг/ч

эффективности технологии, так как стандартная проволока всегда дешевле специально заказываемой. Кроме того, цена проволоки существенно снижается с увеличением ее диаметра. При этом очевидно, что формирование тонких стенок с меньшей шероховатостью удобнее выполнять проволокой меньших диаметров.

Особенно важным становится оптимальный выбор диаметра расходуемой проволоки при необходимости изготовления изделий с толстыми стенками,

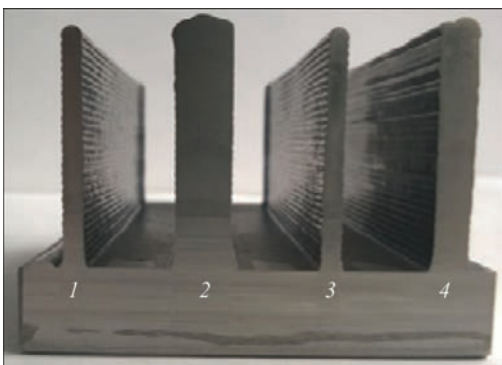


Рис. 10. Стенки различной толщины, сформированные по технологии xBeam 3D Metal Printing проволокой диаметром 2 мм из титанового сплава Ti-6Al-4V с производительностью около 1,1 кг/ч: стенки 1 и 3 за один проход, толщина 3,1...3,3 мм; 2 — три прохода, толщина 10,0...10,3 мм, 4 — два прохода, толщина 6,0...6,2 мм

которые превышают предельную ширину одного наплавочного валика. В этом случае применяется стратегия осаждения нескольких параллельных наплавочных валиков с некоторым перекрытием между соседними проходами, как показано на рис. 10.

Макроструктура толстой стенки, сформированной за несколько параллельных проходов, показана на рис. 11.

Одной из серьезных технологических проблем существующих процессов аддитивного производства металлов является образование столбчатой структуры с направлением роста вверх, когда столбчатые зерна прорастают через все наплавленные слои. Такая структура является весьма нежелательной, так как она приводит к неравномерности свойств в различных направлениях. Технология xBeam 3D Metal Printing, благодаря гибким возможностям управления распределением мощности и динамичному процессу осаждения, что дает возможность обеспечить весьма высокие скорости кристаллизации и последующего охлаждения, продемонстрировала возможность предотвращения образования столбчатой структуры в трехмерных металлических изделиях.

На рис. 12 показана макроструктура образца титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного из проволоки диаметром 2 мм с производительностью около 0,9 кг/ч. Получена структура литого типа с зернами, по форме близкими к равноосным. При этом зерна прорастают через соседние наплавленные слои (не более двух), что подтверждает отсутствие каких-либо межслойных особенностей, сегрегаций и дефектов. Продолжаются исследования механических свойств, а также влияния параметров процесса на структуру и свойства материалов, получаемых послойным осаждением по технологии xBeam 3D Metal Printing.

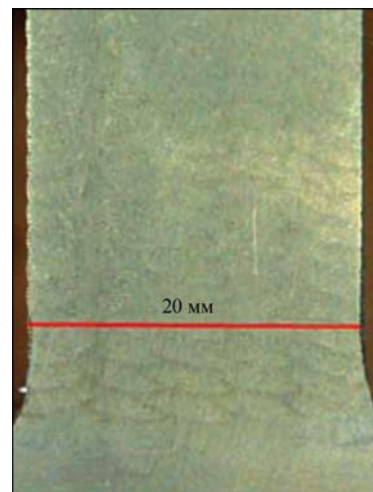


Рис. 11. Макроструктура толстой стенки, сформированной за пять параллельных проходов. Титановый сплав Ti-6Al-4V, проволока диаметром 3 мм, производительность около 2 кг/ч

В процессе пробного изготовления реальных промышленных деталей из титановых сплавов была проведена оценка прямых и сопутствующих эксплуатационных расходов, а также выход годного при производстве изделий по технологии xBeam 3D Metal Printing. Полученные оценочные данные показали операционную себестоимость для титановых сплавов на уровне 40 дол. США за 1 кг готового изделия, при этом учитывалась заключительная механическая обработка для приведения детали к окончательному виду. Это соответствует показателю менее 0,01 дол. США за 1 см³ осажденного материала, что является наименьшим показателем среди всех существующих в настоящее время процессов аддитивного производства металлов.

Для реализации технологии xBeam 3D Metal Printing, изучения ее возможностей и отработки основных технологических приемов была разработана и построена пилотная установка xBeam-01 (рис. 13). Установка отличается простой и компактной конструкцией — для ее эксплуатации достаточно 10 м² полезной площади, т. е. она может быть установлена даже в университетской лаборатории. Загрузка расходного материала может производиться без развакуумирования рабочей камеры, что очень удобно для проведения исследовательских работ. Особенности эксплуатации газоразрядной электронно-лучевой пушки позволяют осуществлять процесс в низком вакууме – в пределах 10⁻²...10⁻¹ мбар, поэтому установка укомплектована одним механическим форвакуумным насосом. Благодаря применению низкого ускоряющего напряжения в электронной пушке (10...15 кВ) повышается безопасность персонала от воздействия рентгеновского излучения из камеры.

Ниже приведены технические характеристики пилотной установки xBeam-01.

Полезный размер (Д×Ш×В), мм	300×300×300
Система позиционирования	трехосевая, линейная
Максимальная мощность, кВт	20
Предельное ускоряющее напряжение, кВ	20
Максимальное энергопотребление, кВт	30
Предельный вакуум, Па	5·10 ⁻¹
Рабочий вакуум, Па	10...50
Возможные виды расходного материала	проволока, прутки, порошковая проволока
	диаметром 1...3 мм
Потребление рабочего газа (гелий), при 0,1 МПа, л/мин	2,5
Рекомендуемое рабочее пространство (Ш×Д×В), мм	3300×3000×2400
Общая масса, кг, примерно	1500

В ходе экспериментальных работ на установке xBeam-01 к настоящему времени была достигнута производительность осаждения 700 см³/ч, что для титановых сплавов соответствует более 3 кг/ч, при этом точность изготовления трехмерных из-

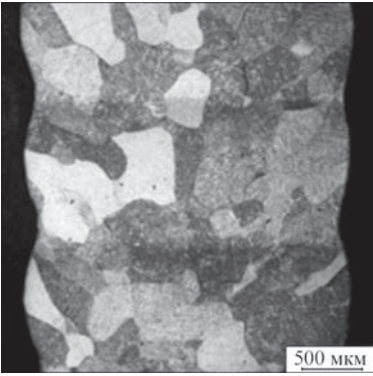


Рис. 12. Макроструктура образца титанового сплава Ti-6Al-4V

делий и шероховатость поверхности требуют последующей чистовой обработки не более 1 мм на каждой стенке, что намного лучше существующих аналогов. Для достижения такой производительности хватило номинальной мощности электронно-лучевой пушки на уровне всего около 7 кВт. Это позволяет ожидать достижения производительности не менее 2000 см³/ч при максимальной номинальной мощности пушки, что соответствует максимальным показателям на рынке аддитивных технологий, продемонстрированных на настоящий момент.

Продолжается разработка автоматического программного управления технологическим процессом, а также испытания средств наблюдения и анализа его параметров и оборудования.

На базе экспериментальной эксплуатации пилотной установки и проводимых усовершенствований специалисты ЧАО «НВО «Червона Хвиля» разрабатывают прототипы серийных установок лабораторного и промышленного класса.

Новая электронно-лучевая технология аддитивного производства xBeam 3D Metal Printing и 3D-принтеры семейства xBeam обещают стать надежным и эффективным оборудованием для быстрого и высококачественного производства



Рис. 13. Установка xBeam-01

сложных деталей и для научно-исследовательских работ за счет использования дешевых стандартных промышленных материалов (проволоки) в качестве расходного материала, минимальных потерь материала при окончательной обработке, бездефектной структуры, простой и безопасной работы, разумной цены оборудования.

Список литературы/References

1. A third industrial revolution. *The Economist*. <http://www.economist.com/node/21552901>.
2. Is 3D Printing the Next Industrial Revolution? *TechCrunch*, <https://techcrunch.com/2016/02/26/is-3d-printing-the-next-industrial-revolution>.
3. (2013) Additive manufacturing market outlook. Value chain-market size-key players-business models. *Additive Manufacturing. A game changer for the manufacturing industry?* Strategy Consultants GmbH, Roland Berger, pp. 19–24.
4. ISO/ASTM 52900:2015 (ASTM F2792). *Additive manufacturing – General principles – Terminology*.
5. *Wohlers Report 2017. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. ISBN 978-0-9913332-3-3.
6. What is Additive Manufacturing? <http://additivemanufacturing.com/basics>.
7. Andrew Zaleski (2015) Here's Why 3D Printing Needs More Metal. *Fortune*, **11**.
8. *3D Printing Processes: The Free Beginner's Guide*. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes>.
9. Chaplais Ch. (2016) 7 Challenges to a Wider Adoption of Additive Manufacturing in the Industry. *Manufacturing Transformation*. <http://www.aprison.com/blog/2016/07/7-challenges-to-a-wider-adoption-of-additive-manufacturing-in-the-industry-part-1>.
10. Gao Wei, Zhang Yunbo, Ramanujan Devarajan et al. (2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, **69**, 65–89.
11. Douglas S. Thomas, Stanley W. Gilbert (2014) *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*. NIST Special Publication 1176.
12. Ковальчук Д. В., Мельник В. Г., Мельник І. В., Тугай Б. А. (2016) *Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів та пристрій для його реалізації*. Україна, Пат. 112682.
12. Douglas, S.T., Stanley, W.G. (2014) Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. NIST Special Publication 1176.
13. Kovalchuk D., Melnyk V., Melnyk I., Tugai B. (2016) Prospects of Application of Gas-Discharge Electrons Beams Guns in Additive Manufacturing. *Electrotechnics and Electronics (E+E)*, **5-6**, 36–42.
14. Махненко О. В., Миленин А. С., Великоиваненко Е. А. и др. (2017) Моделирование температурных полей и напряженно-деформированного состояния малого трехмерного образца при его послойном формировании. *Автоматическая сварка*, **3**, 11–19.
14. Makhnenko O.V., Milenin A.S., Velikoivanenko E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, **3**, 7-14.
15. Ghidini T. (2013) An Overview of Current AM Activities at the European Space Agency. *3D Printing & Additive Manufacturing – Industrial Applications. Global Summit 2013* – London, UK.
16. Clinton R. G. Jr. (2017) NASA Marshall Space Flight Center Additive Manufacturing: Rocket Engines and In Space Manufacturing. *2nd International Symposium Additive Manufacturing. February 8-9, 2017, Dresden, Germany*.

Д. В. Ковальчук, В. І. Мельник, І. В. Мельник, Б. А. Тугай

ПАТ «НВО «Червона Хвиля».
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 15.
E-mail: dv_kovalchuk@yahoo.com

НОВІ МОЖЛИВОСТІ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА З ТЕХНОЛОГІЄЮ xBeam 3D Metal Printing (Огляд)

Нова технологія під назвою xBeam 3D Metal Printing розроблена ПАТ «Червона Хвиля» для вирішення найбільш важливих технічних і економічних проблем існуючих методів адитивного виробництва. Вона заснована на застосуванні профільного електронного променя в якості джерела нагріву і використанні дроту в якості матеріалу, що витрачається. Ключовим елементом нового технічного рішення є спеціальна низьковольтна газорозрядна електронна гармата, в яку уздовж осі вбудована напрямна для подачі дроту, що витрачається. Унікальний порожнистий конічний електронний промінь, що генерується такою гарматою, створює виняткові фізичні умови для розплавлення матеріалу, що витрачається і його пошарового осадження, що забезпечує не тільки можливості точно контрольованого і повторюваного виробництва виробів, але і відкриває можливості створення нових технологій і матеріалів. До теперішнього часу технологія xBeam 3D Metal Printing успішно пройшла перевірку в лабораторних і практичних умовах на експериментальному xBeam 3D-принтері. Бібліогр. 16, рис. 13.

Ключові слова: електронний промінь, газорозрядні електронно-променеві гармати, адитивне виробництво металів, 3D друк металів

D. V. Kovalchuk, V. I. Melnik, I. V. Melnik and B. A. Tugai

JSC «NVO «Chervona Hvilya».
15 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev, Ukraine
E-mail: dv_kovalchuk@yahoo.com

NEW POSSIBILITIES OF ADDITIVE MANUFACTURING USING xBeam 3D Metal Printing Technology (REVIEW)

A new technology called xBeam 3D Metal Printing was developed by JSC «NVO «Chervona Hvilya» to solve the most important technical and economical problems of existing additive manufacturing methods. It is based on application of a profile electron beam as a heat source and wire as a consumable. The key element of the new technical solution is a special low-voltage gas-discharge gun, which is equipped along the axis with a guide for consumed wire feeding. A unique hollow cone electron beam, generated by such a gun, develops the exceptional physical conditions for consumed material melting and its layer-by-layer deposition that provides the possibilities of accurately controlled and repeatable manufacturing of the products as well as reveals new abilities for development of new technologies and materials. Up to the moment xBeam 3D metal Printing has been successfully tested under laboratory and practice conditions on experimental xBeam 3D-printer. Ref. 16, 13 Fig.

Keywords: electron beam, gas-discharge electron beam guns, additive manufacturing of materials, 3D metal printing

Поступила в редакцію 31.10.2017

ПРИМЕНЕНИЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНИКОВ КРИОМОДУЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА

А. Г. БРЫЗГАЛИН¹, Е. Д. ПЕКАРЬ¹, П. С. ШЛЕНСКИЙ¹, Г. Д. ШИРКОВ², Ю. А. БУДАГОВ², Б. М. САБИРОВ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ОИЯИ. 141980, Россия, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6. E-mail: post@jinr.ru

Предложена оригинальная конструкция переходника для соединения криомодулей линейного коллайдера, обеспечивающая необходимые прочность, гелиевую и вакуумную плотность при относительно низкой себестоимости. Разработаны режимы сварки взрывом плоских заготовок титан–нержавеющая сталь–титан, при которых практически отсутствуют интерметаллиды в зоне соединения. Экспериментальным путем подобраны режимы электронно-лучевой угловой сварки ниобиевого патрубка с титаном переходного диска. Изготовлены опытные образцы переходников, которые успешно прошли испытания на термодублирование и гелиевую плотность. Библиогр. 8, рис. 11.

Ключевые слова: коллайдер, сварка взрывом, гелиевая плотность, переходник, ядерные исследования

Разрабатываемый в настоящее время уникальный международный проект линейного коллайдера имеет важное значение для фундаментальных исследований в области ядерной физики и энергетики [1]. Особенность его заключается в том, что разгоняемые частицы будут соударяться в вакуумном пространстве при температуре, близкой к абсолютному нулю. Длина коллайдера будет более 50 тыс. м. Состоять он должен из отдельных криомодулей длиной 1 м, соединяемых между собой переходниками.

Соединяемые элементы криомодуля — ниобиевый сверхпроводящий резонатор, который должен быть приварен электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) к ниобиевому патрубку переходника, и коаксиально расположенный по отношению к ниобиевому резонатору кожух из нержавеющей стали (типа 316L), привариваемый к диску переходника, изготавливаемого из той же нержавеющей стали. Вакуумируемый ниобиевый резонатор находится внутри кожуха из нержавеющей стали, под кожух заливается жидкий гелий (рис. 1). Таким образом, переходник должен обеспечивать вакуумную и гелиевую плотность и работоспособность узла в условиях высокочастотных электромагнитных нагрузок при криогенных температурах [2].

Известно, что наиболее качественные сварные соединения получаются при сварке однородных материалов. Таким образом, переходник должен обеспечить выполнение сварных соединений ниобия с ниобием, а нержавеющей стали с нержавеющей сталью, т.е. переходник должен состоять как минимум из двух металлов — ниобия и нержавеющей стали. Использование для получения соединения ниобия с нержавеющей сталью любых способов сварки плавлением, в том числе ЭЛС,

неприемлемо для решения поставленной задачи в связи с образованием интерметаллидов типа Nb_xFe_y , которые не позволяют обеспечить требуемую плотность переходников.

В ИЭС был изготовлен переходник путем приварки взрывом ниобиевого патрубка непосредственно к диску из нержавеющей стали. Ожидалось, что будет образовываться гораздо меньше интерметаллидов из-за отсутствия высокотемпературного нагрева при сварке взрывом и они не нарушат плотности благодаря большой площади соединения [3]. При этом для сохранения целостности ниобиевой трубы в момент взрыва ширина стальной заготовки должна быть не меньше ширины ниобиевой трубы. На рис. 2 пунктиром указан габарит стальной заготовки до взрыва.

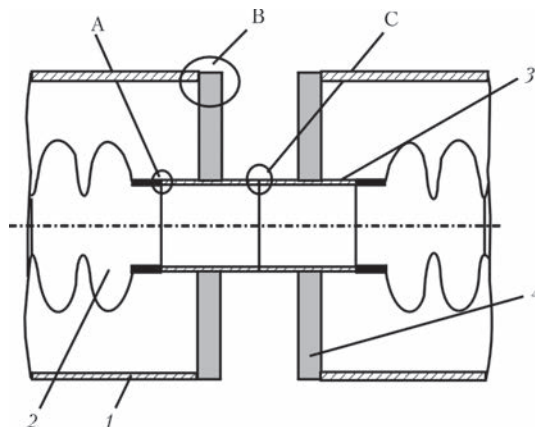


Рис. 1. Схема соединения криомодулей: 1 — кожух из нержавеющей стали; 2 — ниобиевый резонатор; 3 — ниобиевая трубка; 4 — диск из нержавеющей стали; А — соединение резонатора с ниобиевой трубкой ЭЛС; В — соединение кожуха с диском переходника ЭЛС или аргонодуговой сваркой; С — соединение ниобиевых трубок переходников ЭЛС

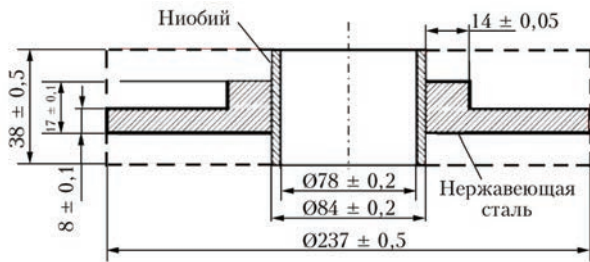


Рис. 2. Схема изготовления переходника с применением сварки взрывом ниобия с нержавеющей сталью

Для обеспечения требуемых геометрических размеров переходника с учетом неизбежных деформаций ниобия от взрыва потребуется использовать ниобиевую трубу с меньшим наружным диаметром и большей толщиной стенки с тем, чтобы после сварки взрывом изготовить переходник с необходимыми размерами с помощью механической обработки. При механической обработке часть ниобия и значительная часть нержавеющей стали уйдет в стружку, такой способ не годится для промышленного применения из-за высокой трудоемкости, дороговизны и большого расхода дефицитного ниобия. Гелиевая плотность соединения не исследовалась.

Ранее проведенные эксперименты показали, что при электронно-лучевой сварке ниобия с титаном не образуется интерметаллидов и обеспечивается необходимая плотность соединений по гелию и вакууму. В связи с этим был предложен следующий вариант изготовления переходника.

Диск из нержавеющей стали вначале плакируется с двух сторон титаном с помощью сварки взрывом, затем, после придания полученному триметаллу необходимой формы (путем правки и обточки в размер) вырезается отверстие под ниобиевый патрубок. Патрубок вставляется в отверстие и приваривается к титану ЭЛС (рис. 3). Возможное образование интерметаллидов в соединении титана со сталью, получаемом сваркой взрывом, не влияет на работоспособность переходника, так как через него гелий не может попасть в полость ниобиевой трубы.

Преимущества предлагаемого варианта изготовления переходника:

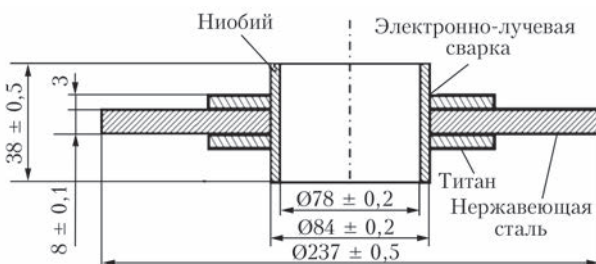


Рис. 3. Конструкция переходника, обеспечивающая отсутствие образования при сварке интерметаллидов ниобия

- гелиевая плотность обеспечивается сваркой ниобия с титаном, обладающими хорошей свариваемостью;

- отверстие во фланце изготавливается в размер ниобиевой трубки, при этом может быть вварен патрубок резонатора вместо трубки-переходника;

- возможное образование интерметаллидов в зоне соединения стали с титаном при сварке взрывом не влияет на гелиевую плотность;

- технологически сварка взрывом плоских образцов существенно проще сварки трубных заготовок и позволяет получать соединения с максимально возможной стабильностью качества, что уменьшает вероятность брака;

- после сварки взрывом, в случае необходимости, отбраковываться будут более дешевые сталь-титановые заготовки;

- сталь-титановый фланец может быть подвергнут термообработке для снижения остаточных напряжений в обычной (не вакуумной) печи;

- уменьшается расход стали и ниобия.

Соединение титан–сталь весьма трудно сваривается взрывом в связи с тем, что эти металлы образуют хрупкие химические соединения при сварке и при последующей термической обработке. Стоит отметить, что титан образует интерметаллиды почти со всеми металлами за исключением ниобия, тантала и ванадия. В частности, при сварке титана со сталью образуются хрупкие интерметаллидные соединения Fe_2Ti и FeTi . В случае образования значительного количества интерметаллидов (в виде сплошной прослойки) прочность соединения снижается до нуля. Отдельные редкие точечные включения не влияют на статическую прочность соединения [4].

Для роста интерметаллидной фазы необходимым условием является не только высокая температура, но и некоторое время существования высоких температур – латентный период. Сварка взрывом как очень быстротечный процесс обеспечивает минимальное время нахождения контактной зоны под воздействием высоких температур. В этом заключается преимущество использования сварки взрывом для создания подобных сочетаний металлов и сплавов [5].

Экспериментально были подобраны режимы сварки взрывом триметалла титан–сталь–титан. Толщина титана 3 мм, стали 8 мм. Сваривались пластины размером 250×250 мм и 300×700 мм. Правка пластин после первого взрыва и после изготовления триметалла осуществлялась на промышленных вальцах вначале трехвалковых (заготовке придавалась дугообразная форма) для устранения локальных деформаций, а затем на девятивалковых

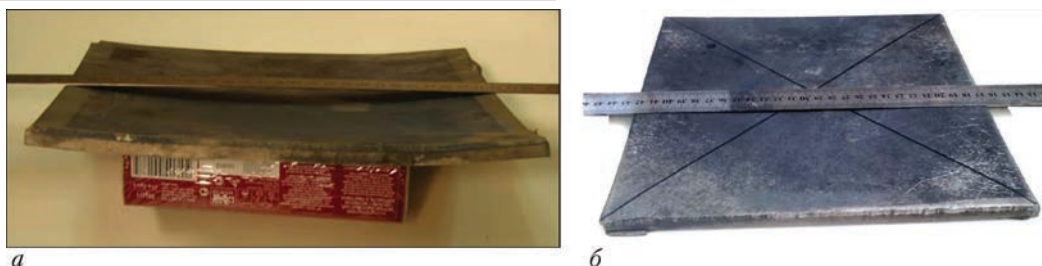


Рис. 4. Внешний вид сваренной взрывом заготовки: а — до правки, б — после

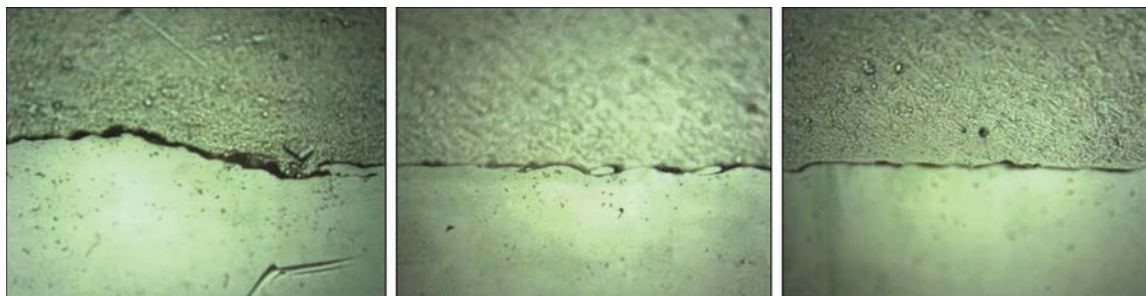


Рис. 5. Микроструктура ($\times 400$) соединения сталь–титан, полученного сваркой взрывом

для придания заготовке плоской формы. Необходимость правки продемонстрирована на рис. 4.

Из триметаллических заготовок вырезались диски диаметром 237 мм с центральным отверстием под ниобиевый патрубок диаметром 84 мм. Максимальный остаточный прогиб диска составил 0,5 мм.

На рис. 5 приведены фотографии микрошлифов с характерными участками соединения сталь–титан, полученного на выбранных режимах сварки. Волнообразование практически отсутствует, что свидетельствует о выборе оптимального для данного случая режима с минимальным энерговыделением, что уменьшает количество и размер образующихся интерметаллидов.

На микрошлифе по границе соединения видны удлиненные темные полосы, а также, изредка, белые пятна небольшого размера, которые могут быть интерметаллидами.

Для определения природы полос и пятен проведены исследования микротвердости методом Виккерса. Результаты измерений твердости при нагрузке 100 г представлены на рис. 6.

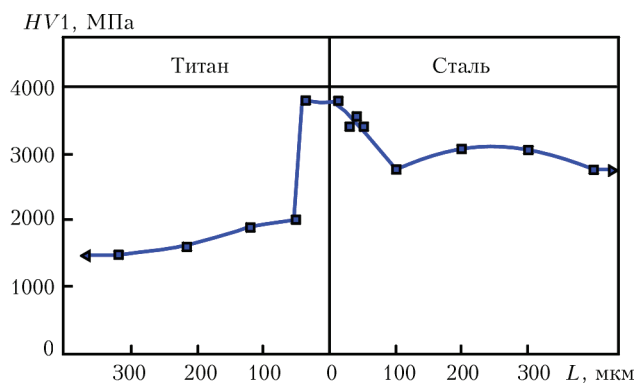


Рис. 6. Микротвердость на границе сварки взрывом сталь–титан

Ширина темных полос составляла порядка 10 мкм. Вблизи границы соединения микротвердость измерялась по темным полосам. Твердость исходного титана 1300...1600, исходной стали 1700...1900 МПа. Известно, что твердость интерметаллидов типа Fe_xTi_y выше 9000 МПа. Из рис. 6 видно, что титан и сталь претерпели значительное упрочнение в результате соударения при сварке взрывом, титан уже на расстоянии 300 мкм от границы имеет свою начальную твердость, сталь упрочняется на большую глубину. Достигнутое упрочнение не может повлиять на рабочие свойства переходника [6]. Отсутствие резких скачков твердости вблизи границы свидетельствует о том, что темные полосы не являются интерметаллидами.

В процессе исследования было установлено, что на границе соединения имеется ступенька, которая могла образоваться в результате травления при изготовлении шлифа или по другим причинам. По-видимому, темные полосы представля-

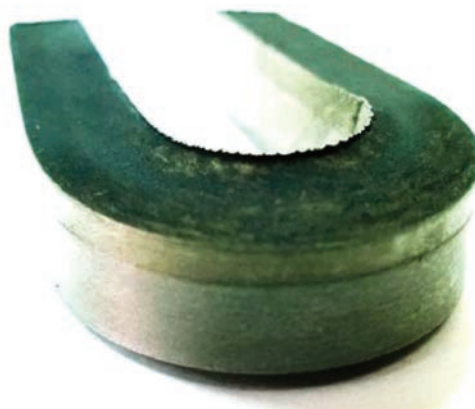


Рис. 7. Образец биметалла сталь–титан после испытания на загиб

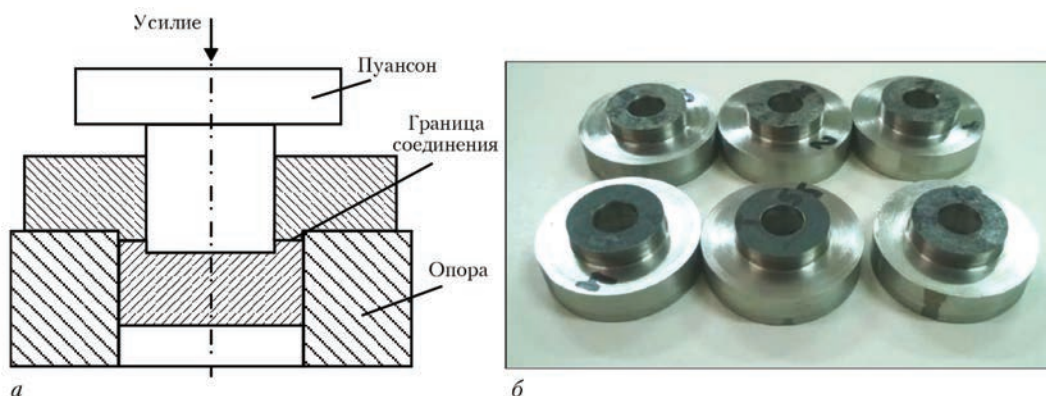


Рис. 8. Схема испытания на отрыв слоев биметалла (а) и общий вид образцов (б)

ют собой либо загрязнение, скопившееся вдоль ступеньки при шлифовке, либо тень от ступеньки, образующуюся в результате освещения шлифа лампой микроскопа.

Измерение микротвердости белых пятен и стали вокруг них при нагрузке 10 г показало их равнозначность и свидетельствует о том, что это не интерметаллиды.

Качество полученного сваркой взрывом соединения титана со сталью оценивали стандартными методами испытаний: на загиб, на отрыв слоев и срез слоев [7].

На рис. 7 показан образец после испытания на загиб. При загибе на угол 180° образец сохранил свою целостность, расслоения не произошло. Это довольно жесткий вид испытаний, при некачественной сварке граница соединения металлов разрушается.

На рис. 8 представлены схема испытания на отрыв слоев биметалла и общий вид образцов.

Разрушение образцов произошло по границе раздела сталь–титан, что характерно для этой пары металлов [8]. Прочность на разрыв составила 375 МПа. Испытания на растяжение листового титана в исходном состоянии показали, что предел текучести составляет 390 МПа, предел прочности 430 МПа. Прочность соединения ненамного уступает прочности менее прочного из соединяемых металлов.

Испытания на срез слоев (рис. 9) показали прочность на уровне 350 МПа. Такая высокая прочность на срез, сопоставимая с прочностью на отрыв, достигается благодаря волновой границе соединения сталь–титан. Условия эксплуатации переходника не предполагают приложение к нему нагрузок, приводящих к срезу или отрыву слоев, прочность соединения можно считать удовлетворительной.



Рис. 9. Схема испытания образца на срез слоев

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что разработанный режим сварки триметаллической заготовки переходника является близким к оптимальному.

Наклеп металлов и остаточные напряжения в получаемом триметалле могут быть сняты термообработкой. Безопасным нагревом для этой композиции является нагрев до 600°C . При нагреве свыше 700°C начинается интенсивное формирование интерметаллидов и карбидов [4].

В случае сварки титана с нержавеющими аустенитными сталями вопрос необходимости термообработки должен быть отдельно проработан, так как при нагреве и остывании аустенит может преобразовываться в мартенсит, что изменяет свойства стали, в том числе ее намагничиваемость, которая снижает эффективность коллайдера.

Эффективность применения термообработки для повышения механических свойств триметалла исследована на образцах после термообработки заготовки по режиму 600°C , выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Прочность на отрыв слоев составила 325 МПа (375 МПа без термообработки), прочность на срез слоев — 345 МПа (350 МПа без термообработки). Не обнаружено существенных отличий в микроструктуре металлов в зоне соединения по сравнению с образцом без термообработки, изготовленном из той же заготовки триметалла. Микротвердость по Виккерсу при нагрузке 10 г составила: для стали 2500 МПа (2600 МПа без термообработки), для титана 2600 МПа (2150 МПа без термообработки). На микрошлифах на границе соединения обнаружено большее количество белых пятен, которые имеют микротвердость 2300 МПа и не являются интерметаллидами. Скорее всего, это участки микроплавов металла, образующиеся при сварке взрывом. Интерметаллидов в исследованных шлифах не обнаружено. Таким образом, термообработка по приведенному режиму не повлияла на требуемые в работе свойства триметалла. Увеличение температуры отжига нежелательно, так как может привести к появлению ин-

терметаллидов и изменению свойств аустенитной стали. Предварительно можно заключить, что термообработку заготовок триметалла проводить нецелесообразно, так как это лишь увеличивает стоимость переходника.

Выбор режимов ЭЛС. Использование для изготовления резонаторов высокочистого ниобия вынуждает любые термические операции с ним, в том числе сварку, выполнять в вакууме. ЭЛС наилучшим образом подходит для нашего случая, так как процесс проходит в камере с высокой степенью вакуумирования.

Для выполнения ЭЛС необходимо как можно более плотное прилегание свариваемых деталей друг к другу. Поскольку ниобиевая труба имеет исходную овальность, по окружности прилегания ниобиевого патрубка к кромке отверстия в триметаллическом диске имеются места с большим зазором, не пригодным для ЭЛС. Для устранения этого недостатка изготовлено приспособление, фиксирующее патрубок в отверстии диска. Диск с зажатым патрубком вставлялся в патрон токарного станка, вместо резца крепился ролик. Обкаткой ниобиевого патрубка изнутри достигалось плотное его прилегание к кромкам отверстия диска.

При изготовлении опытного переходника применен предварительный режим ЭЛС. Исследование структуры соединения показало, что глубина проплавления титана составила примерно 1 мм. По утверждению специалистов ЭЛС, имеющих большой опыт в выполнении плотных, в том числе по гелию, швов, такого проплавления вполне достаточно для обеспечения гелиевой плотности. В то же время

на переходник могут действовать нагрузки, образующиеся от избыточного давления внутри криомодуля вследствие наличия вакуума с внешней стороны переходника, а также возможного нагрева жидкого гелия от элементов конструкции криомодуля в процессе заполнения его жидким гелием и теплопроводности переходника, контактирующего по контуру с кожухом. В связи с этим представляется целесообразным выполнять шов по возможности более мощным, в то же время не допуская полного проплавления титана и ниобия электронным лучом. На модельном образце в титановый диск толщиной 3 мм был вварен ниобиевый патрубок с использованием четырех режимов ЭЛС. На рис. 10 представлены шлифы полученных соединений и указана ширина сварного соединения.

Наибольшее проплавление достигнуто на режимах 3 и 4. Эти режимы будут использоваться при изготовлении последующих переходников. Конкретный выбор будет зависеть от толщины титана, остающейся после механической обработки при изготовлении диска из триметаллической заготовки.

На сегодня изготовлено два переходника, причем один из них подвергнут термообработке. Оба переходника прошли испытания на термоциклирование в жидком азоте, затем в жидком гелии. После каждого вида термоциклирования переходники испытывались на гелиевую плотность. Во всех случаях получены положительные результаты испытаний.

На рис. 11 показаны варианты внешнего вида переходника. Отверстия выполнены для проведе-

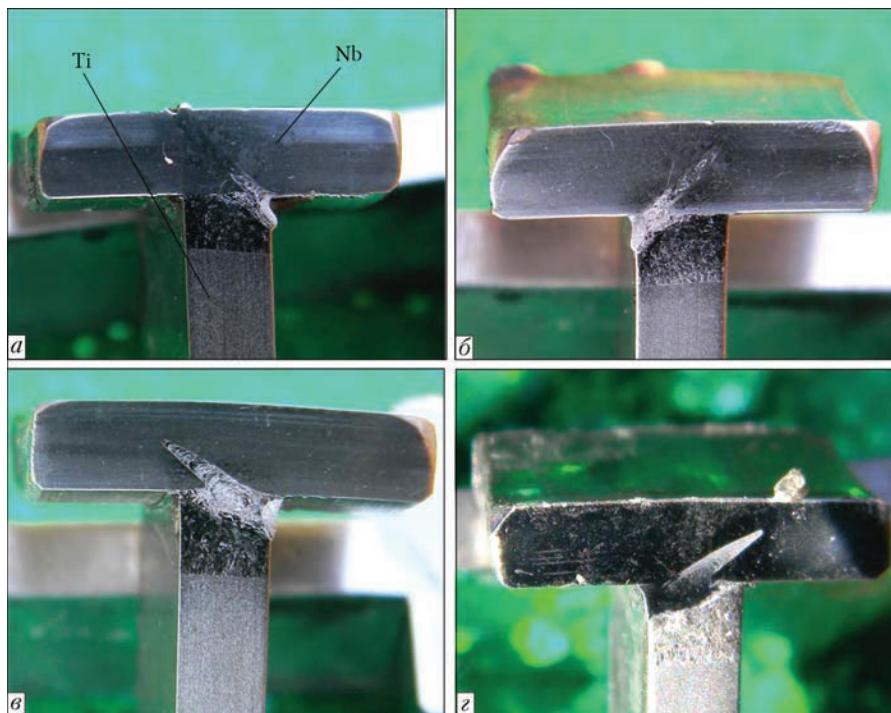


Рис. 10. Шлифы соединения титана с ниобием, полученного ЭЛС: а — режим 1 (ширина соединения 1,5 мм); б — режим 2 (ширина соединения 1,9 мм); в — режим 3 (ширина соединения 2,75 мм); г — режим 4 (ширина соединения 2,1 мм)

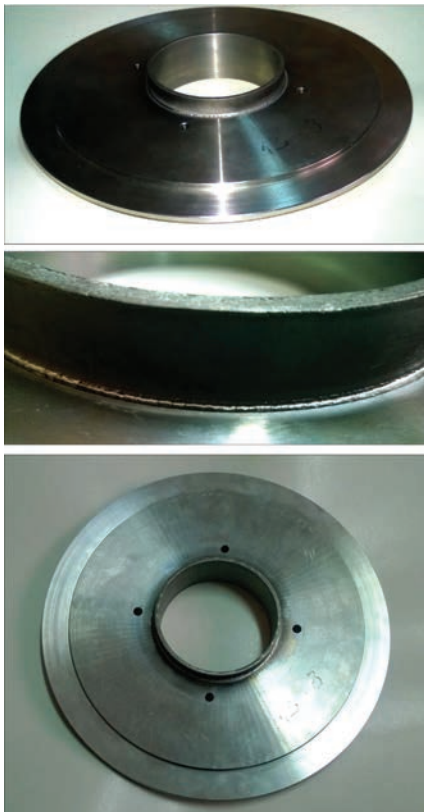


Рис. 11. Внешний вид изготовленного переходника
некоторых исследований, в реальном переходнике отверстий не будет.

Выводы

1. Разработана конструкция переходника, пригодная для изготовления криомодуля линейного коллайдера и позволяющая исключить приварку ниобия к стали.
2. Разработана технология сварки взрывом триметаллической заготовки для изготовления переходника, обеспечивающая отсутствие интерметаллидов на границе соединения сталь–титан.
3. Выбраны режимы ЭЛС ниобия с титаном, которые, по предварительным оценкам, должны удовлетворять эксплуатационным требованиям переходника.

Список литературы/References

1. International Linear Collider. (2013) *Technical Design Report*. www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report.
2. Sabirov B. (2010) Explosion welding: New Design of the ILC Cryomodule. *JINR NEWS*, **3**, 16–20.
3. Лысак В. И., Кузьмин С. В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie.
4. Гуревич С. М. (1981) *Справочник по сварке цветных металлов*. Киев, Наукова думка.
Gurevich, S.M. (1981) *Reference book on welding of non-ferrous metals*. Kiev, Naukova Dumka.
5. Ryabov V. R., Dobrushin L. D., Moon J. G. (2003) *Welding of bimetal*. Paton B. E. (ed.), Kiev, E. O. Paton Electric Welding Institute.

6. Petushkov V. G., Fadeenko Yu. I. (1995) *Explosion-thermal treatment of welded joints*. Paton B. E. (ed.) *Welding and Surfacing Review*; Vol. 8, Pt. 2. London, Harwood acad. publ.
7. Petushkov V. G., Simonov V. F., Sedykh V. S., Fadeenko Yu. I. (1996) *Explosion welding criteria*. Paton B. E. (ed.) *Welding and Surfacing Review*, Vol. 3, Pt. 4. London, Harwood acad. publ.
8. Petushkov V. G. (2009) *Explosion and its applications in metalworking*. New York, Nova Science publ.

А. Г. Бризгалін¹, Є. Д. Пекар¹, П. С. Шльонський¹,
Г. Д. Ширков², Ю. А. Будагов², Б. М. Сабіров²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office @ paton. kiev.ua

²ОИЯД. 141980, Росія, м Дубна, вул. Жоліо-Кюрі, 6.

E-mail: post@jinr.ru

ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТРИМЕТАЛІЧНИХ ПЕРЕХІДНИКІВ КРІОМОДУЛІВ ЛІНІЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА

Запропоновано оригінальну конструкцію переходника для з'єднання криомодулів лінійного коллайдера, що забезпечує необхідні міцність, гелієву і вакуумну щільність при відносно низькій собівартості. Розроблено режими зварювання вибухом плоских заготовок титан–нержавіюча сталь–титан, при яких практично відсутні інтерметаліди в зоні з'єднання. Експериментальним шляхом підібрано режими електронно-променевого кутового зварювання ніобієвого патрубку з титаном перехідного диска. Виготовлено дослідні зразки перехідників, які успішно пройшли випробування на термоциклування і гелієву щільність. Бібліогр. 8, рис. 11.

Ключові слова: коллайдер, зварювання вибухом, гелієва щільність, перехідник, ядерні дослідження

A.G. Bryzgalin¹, E.D. Pekar¹, P.S. Shlensky¹,
G.D. Shirkov², Yu. A. Budagov², B.M. Sabirov²

¹E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev-150, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²JINR, 6, Joliot Curie str., 141980, Dubna, Russia. E-mail:
post@jinr.ru

APPLICATION OF EXPLOSION WELDING FOR MANUFACTURE OF TRIMETALLIC TRANSITION PIECES OF CRYOMODULES OF LINEAR COLLIDER

An original design of transition piece for joining cryomodels of linear collider was proposed, providing necessary strength, helium and vacuum density at relatively low cost. The modes of explosion welding of plane billets titanium–stainless steel–titanium at which intermetallics in the joining zone are almost absent. The modes of electron beam fillet welding of niobium branch pipe with titanium transition disc were selected experimentally. The experimental specimens of transition pieces were manufactured which successfully passed tests on thermocycling and helium density. 8 Ref., 11 Fig.

Keywords: collider, explosion welding, helium density, transition piece, nuclear research

Поступила в редакцію 27.11.2017

ТОРЦЕВАЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ЭЛЕКТРОДОМ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, В. А. ЖДАНОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Торцевую электрошлаковую наплавку предложено выполнять с использованием токоподводящего кристаллизатора (ТПК) и вводом в его центральную часть переплавляемого электрода большого сечения. При этом предложены две электрические схемы подключения переплавляемого электрода. По первой схеме как к расходуемому, так и кольцевому нерасходуемому (верхняя секция ТПК) электродам подведен одинаковый потенциал. По второй схеме потенциалы на обоих электродах отличаются. В результате проведенных на флюсе АНФ-29 опытных наплавов в ТПК диаметром 180 мм электродами из стали 40 диаметром 40...130 мм была предложена следующая техника выполнения наплавов. После наведения в ТПК шлаковой ванны первый этап (соединение основного и наплавленного металлов) рекомендуется выполнять по первой электрической схеме. При этом плавление электрода будет замедленным, но при оптимальной вводимой в шлаковую ванну через ТПК электрической мощности можно достичь равномерного проплавления основного металла. В дальнейшем, при наплавке последующих слоев с повышенной производительностью и хорошим качеством наплавленного слоя следует переходить на вторую электрическую схему подключения переплавляемого электрода. Библиогр. 8, рис. 5.

Ключевые слова: торцевая ЭШН, электрод большого сечения, ТПК, электрические схемы ЭШН, проплавление основного металла, формирование наплавленного металла, производительность

Качество наплавки, выполненной любым известным способом, особенно при соединении металлов с резко отличающимися свойствами, во многом определяется возможностью достигать минимального и равномерного проплавления по всей соединяемой поверхности. В противном случае не решается полностью задача придания наплавленному металлу специальных свойств (износостойкости, стойкости против термической усталости, коррозионной стойкости и т. д.). Это особенно важно при наплавке относительно небольших толщин наплавленного металла. В зависимости от способа электрошлаковой наплавки (ЭШН), доля основного металла в наплавленном составляет 5...20 % [1]. Тем не менее, главным преимуществом многих способов ЭШН, помимо высокой производительности процесса, является возможность нанесения больших масс металла.

В этом случае сохранение заданных специальных свойств наплавленного металла по толщине наплавленного слоя (особенно в слоях, достаточно удаленных от зоны сплавления) не вызывает каких-либо трудностей. Сложности могут возникнуть в зоне сплавления биметалла из-за большей или меньшей степени перемешивания соединяемых металлов и возникновения в этой зоне промежуточных структур с хрупкими составляющими (мартенсит, карбидные, нитридные и т. п. выделения с различными размерами и характером расположения), которые резко снижают механическую прочность соединения, либо уже в процессе наплавки способствуют образованию дефектов,

чаще всего трещин. Поэтому именно эта проблема зачастую не позволяет полностью реализовать все достоинства высокопроизводительного процесса. Красноречивым примером такого положения является так называемая объемная ЭШН зубьев ковшей карьерных экскаваторов [2]. Это хорошая технология, решает большую задачу реставрации дорогостоящего горного инструмента, но наплавленные (отреставрированные) ковши стараются ставить в эксплуатацию на относительно легко обрабатываемые породы, при переработке которых не возникает повышенных ударных нагрузок.

Казалось бы, наиболее простым решением этой проблемы является выполнение сложной термической обработки биметаллического изделия. Но это в большинстве случаев выполнить просто невозможно из-за отсутствия соответствующих по размерам и температурам термических печей и, самое главное, снижается эффективность процесса наплавки, теряется целесообразность ее применения.

Таким образом, несмотря на то, что величина проплавления является важной характеристикой любого способа наплавки (дугового, плазменного и т. д.), для ЭШН она приобретает особое значение в случае некачественной наплавки больших масс зачастую дорогостоящего металла. Следует отметить, что в этом случае и удаление дефектов зоны сплавления представляет собой трудновыполнимую задачу.

Целью работы является получение первичных экспериментальных данных и выбора направле-

ния дальнейших исследований для создания системы автоматического регулирования качества торцевой ЭШН электродом большого сечения в ТПК.

При ЭШН в водоохлаждаемых устройствах-кристаллизаторах в качестве электродов обычно используют либо проволочные и ленточные электроды, либо так называемые электроды большого сечения (прутки, стержни и т. п. с площадью сечения примерно до 35000 мм²). Эти технологии можно рассматривать как частные случаи известного и хорошо изученного электрошлакового процесса — электрошлакового переплава (ЭШП). Отличие состоит лишь в том, что в первом случае на поверхности заготовки наплавляется металл той или иной толщины, во втором первоначальный слой металла слитка начинает формироваться на затравке, представляющей собой пластину толщиной 10...30 мм. Если для ЭШН, как мы уже отмечали, величина проплавления играет существенную роль, то при ЭШП задача состоит лишь в хорошем сплавлении металлов затравки и слитка, тем более что после переплава эта нижняя (донная) часть слитка удаляется (до 15 % массы слитка) [3]. Для нас важно оценить, как в близком к ЭШН процессе формируется металлическая ванна (размеры, глубина), так как именно тепло, передаваемое от ванны к затравке, определяет нагрев и проплавление последней.

Из рис. 1 видно, что основная тепловая энергия выделяется под торцом электрода, придавая металлической ванне специфическую конусообразную форму. Соответственно, проплавление затравки максимально по оси слитка с его уменьшением (или исчезновением) по краям слитка. Из этого анализа следует, что такой способ соединения металлов не может быть применен для получения качественной наплавки.

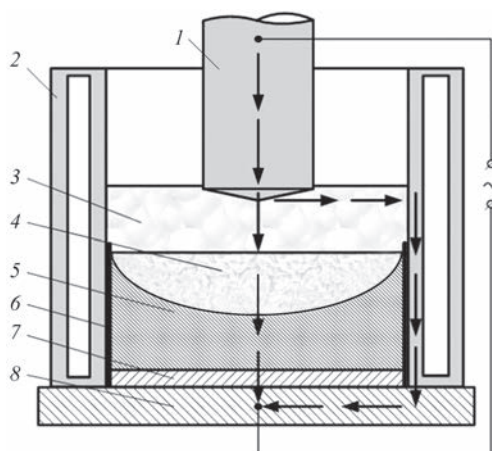


Рис. 1. Форма металлической ванны при ЭШП (стрелками показано распределение тока в кристаллизаторе): 1 — электрод; 2 — кристаллизатор; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — слиток; 6 — гарнизаж; 7 — затравка; 8 — поддон

Для устранения этого недостатка перспективным может оказаться применение для наплавки ТПК [4-7], который, по сути, является секционным нерасходуемым электродом кольцевого типа, к верхней секции которого подведено напряжение. Такая форма электрода, соответственно, влияет на характер распределения тока в шлаковой ванне. Ток со стенки электропроводящего кольца частично идет по горизонтальному направлению, но, главным образом, вертикально, на наплавляемую поверхность заготовки. Причем большая его часть проходит непосредственно в пристенной области кристаллизатора. Это подтверждается и результатами работы [8] по моделированию процесса торцевой наплавки на электропроводной бумаге: примерно 50...90 % тока (в зависимости от удаления от стенки кристаллизатора) протекает именно в этой области.

На рис. 2 представлена форма металлической ванны, получаемая при наплавке в ТПК дискретной присадкой, т.е. при отсутствии в середине кристаллизатора теплового центра, создаваемого электродом, как это имеет место при обычном ЭШП.

Можно предположить, что если ввести в ТПК расходуемый наплавочный электрод и оптимально распределить электрическую мощность между кольцевым нерасходуемым электродом и плавящимся расходуемым, то можно обеспечить минимальное и равномерное проплавление основного металла.

Были проведены эксперименты по изучению возможности использования при наплавке одной из двух электрических схем подключения расходуемого электрода (рис. 3). По первой схе-

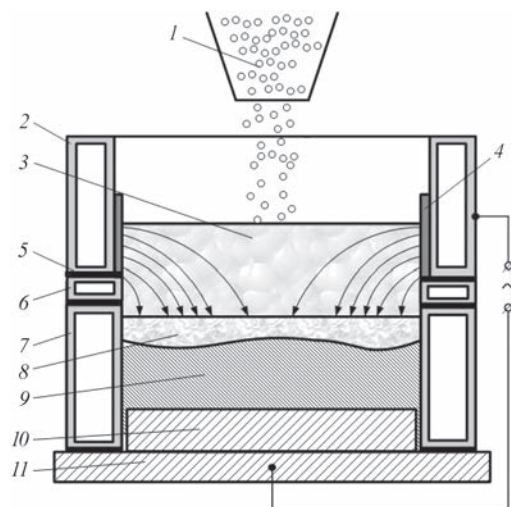


Рис. 2. Форма металлической ванны, получаемая при ЭШН в ТПК дискретной присадкой (стрелками показано распределение тока в ТПК): 1 — дискретная присадка; 2, 6, 7 — токопроводящая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора, соответственно; 3 — шлаковая ванна; 4 — защитная футеровка; 5 — изоляционная прокладка; 8 — металлическая ванна; 9 — наплавленный металл; 10 — заготовка; 11 — поддон

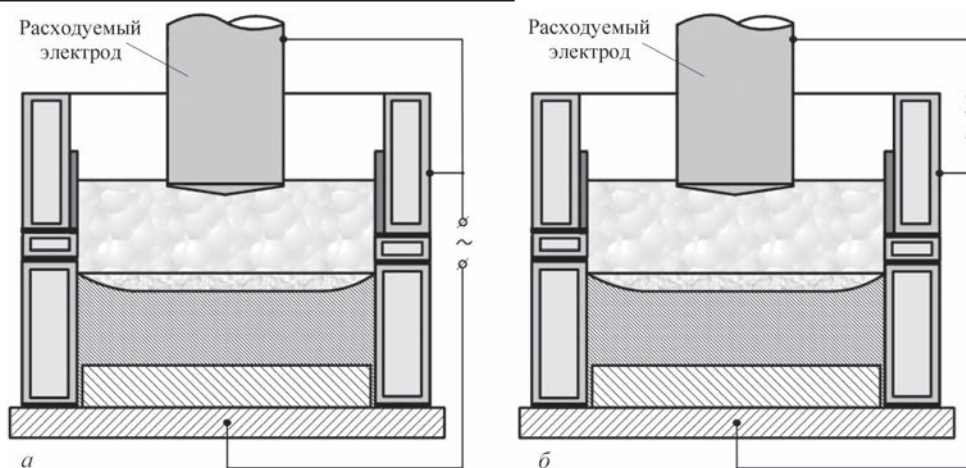


Рис. 3. Электрические схемы подключения переплавляемого электрода при одинаковом (а) и отличающемся (б) потенциале с ТПК

ме (рис. 3, а) к электродам разного типа подведен одинаковый потенциал, по второй – расходувемый электрод имеет иной потенциал.

В качестве критерия оптимальности технологии, кроме достижения минимального и равномерного проплавления основного металла, принимали во внимание качество формирования наружной поверхности наплавляемого слоя и производительность наплавки.

Эксперименты по наплавке выполняли на твердом старте в стационарном ТПК диаметром 180 мм электродами из стали 40 диаметром 40...130 мм. Флюс АНФ-29, ток переменный.

Из наплавленных заготовок механическим путем изготавливали продольные шлифы, на которых после шлифовки и химического травления изучали зону сплавления. Внешний вид наплавленных заготовок (боковую поверхность и верхнюю плоскость слоя) оценивали визуально.

Эксперименты по наплавке по первой (рис. 3, а) электрической схеме (одинаковые потенциалы на электроде и ТПК) показали следующее. Плавление электрода диаметром 90 мм происходит очень медленно (при сравнении с процессом ЭШП) при его заглублении в шлаковую ванну от 15 до 70 мм. Причем плавление электрода идет лишь по его торцевой части (боковая поверхность не оплавляется). Проплавления основного металла не наблюдается. Боковая поверхность наплавленного металла имеет гофры. В случае использования электрода большего диаметра (130 мм) сам процесс наплавки и ее результаты аналогичны результатам наплавки с использованием электрода диаметром 90 мм.

При наплавке электродом диаметром 40 мм наблюдается как ускоренное плавление электрода (при общей подводимой мощности $N = 99 \text{ кВ} \cdot \text{А}$), так и замедленное ($N = 87 \text{ кВ} \cdot \text{А}$).

По-видимому, стабильность процесса ЭШН, скорость вращения шлаковой ванны, влияющая на плавление электрода и, в конечном счете, произ-

водительность процесса и качество наплавки, во многом определяются вводимой в шлаковую ванну через ТПК электрической мощностью $N_{\text{ТПК}}$. На рис. 4 показан продольный макрошлиф биметаллической заготовки, полученной наплавкой электродом диаметром 40 мм с $N = 87 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Как следует из результатов наплавки по данной электрической схеме, при использовании электродов различного диаметра глубокое проплавление основного металла не наблюдается ни в пристенной зоне кристаллизатора, ни под электродом. Следовательно, такая схема ЭШН, в принципе, позволяет создать равномерное тепловое поле и, соответственно, одинаковые условия проплавления по всей наплавляемой поверхности заготовки при соответствующей оптимальной вводимой через ТПК электрической мощности. Еще одним косвенным подтверждением выравнивая электрической мощности по поперечному сечению кристаллизатора и формирования в нем более плоской металлической ванны, является наблюдаемое в процессе наплавки увеличение скорости вращения шлаковой ванны при извлечении электрода из шлака за счет перераспределения рабочего тока на электрод и ТПК в пользу последнего.

Наплавки по второй (рис. 3, б) электрической схеме подсоединения переплавляемого электрода

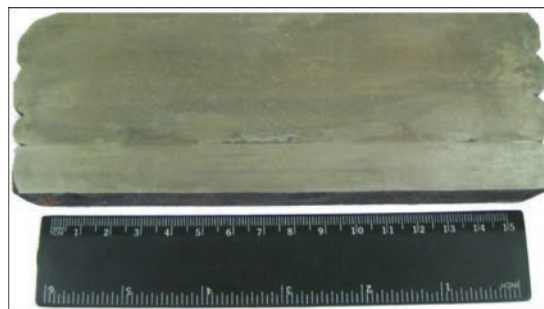


Рис. 4. Продольный макрошлиф биметаллической заготовки, полученной наплавкой электродом диаметром 40 мм при $N_{\text{ТПК}} = 87 \text{ кВ} \cdot \text{А}$

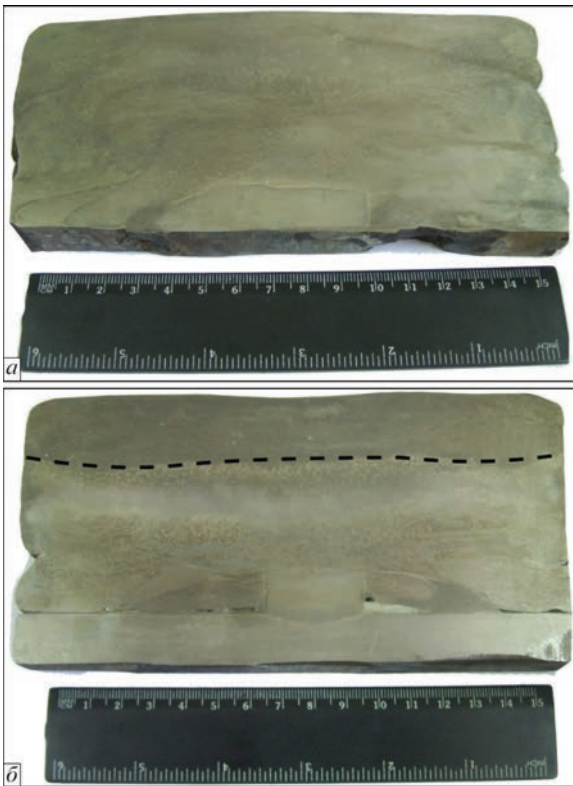


Рис. 5. Продольный макрошлиф биметаллической заготовки, полученной наплавкой электродом диаметром 90 мм при $N_{\text{ТПК}} = 80...90$ (а) и $130...135$ кВ·А (б) (штриховой линией обозначена форма металлической ванны в наплавленном металле)

показали следующие результаты. Прежде всего, эта технология наплавки позволяет значительно повысить производительность процесса плавления электрода. Так, при наплавке электродом диаметром 40 мм скорость плавления электрода увеличивается до двух-трех раз, а электродом диаметром 90 мм — примерно в 2 раза. Формирование наплавленного металла и качество зоны сплавления существенно зависят от режима наплавки. На рис. 5 представлены макрошлифы образца, полученного наплавкой электродом диаметром 90 мм при разной электрической мощности процесса. При малой мощности ($N_{\text{ТПК}} = 80...90$ кВ·А) в центральной части шлифа наблюдается сформированное под воздействием переплавляемого электрода «нулевое» сплавление (по типу пайки) на длине 40 мм, остальные зоны имеют глубокое проплавление (≥ 20 мм) — рис. 5, а. Это объясняется тем, что в данном случае наибольший ток шел от кольцевого нерасходуемого электрода. При этом формирование боковой поверхности наплавленного слоя неудовлетворительное (наличие множества гофр). При $N_{\text{ТПК}} = 130...135$ кВ·А (рис. 5, б) центральная часть шлифа на длине примерно 50 мм имеет небольшое проплавление (около 5 мм), в остальных зонах на линии сплавления много шлаковых прослоек, без проплавления основ-

ного металла. Металлическая ванна в наплавленном металле имеет относительно плоскую форму.

Из сказанного выше следует, что наплавки по технологиям с различным электрическим подключением переплавляемого электрода могут обеспечить получение равномерного и минимального проплавления основного металла и достижения других критериальных показателей при введении в шлаковую ванну оптимальной электрической мощности. По-видимому, можно принять для решения поставленной задачи следующую технику наплавки. После наведения в токоподводящем кристаллизаторе шлаковой ванны (при твердом или жидком старте) первый этап наплавки (соединения основного и наплавленного металлов) необходимо выполнять по первой схеме подключения переплавляемого электрода. При этом плавление электрода будет замедленным, но при оптимальной вводимой в шлаковую ванну через ТПК электрической мощности можно достичь равномерного проплавления основного металла. В дальнейшем, т. е. при наплавке слоя большой толщины, когда необходимо получить повышенную производительность процесса и качественную поверхность наплавленного слоя, следует переходить на вторую схему электрического подключения электрода.

В целом, выполненные эксперименты показали, что регулирование тепловых потоков при торцевой ЭШН как в зоне сплавления, так и при формировании наплавленного слоя это сложная задача, решение которой зависит от многих параметров (как геометрических, так и электрических). Поэтому дополнительно необходимо выполнить детальное, всестороннее исследование этого способа наплавки. При этом следует рассмотреть следующее: использование иных схем подключения, иного количества источников питания и видов применяемого тока, применение не только переплавляемых электродов, но и нетоковедущих расходуемых заготовок различного диаметра, оптимизацию положения наплавленной поверхности по отношению к токоведущей секции ТПК.

Проведение таких исследований позволит не только найти оптимальное решение поставленной задачи, но и создать предпосылки для автоматического регулирования процесса торцевой ЭШН и получения заданных результатов качества даже при отклонении значений некоторых параметров от первоначально заданных.

Выводы

1. В отличие от иных способов наплавки качество электрошлаковой наплавки больших масс металла существенно зависит от качества зоны сплавления

основного и наплавленного металлов и в меньшей мере от качества самого наплавленного металла.

2. Рассмотрена возможность выполнения торцевых ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе электродом большого сечения по двум электрическим схемам – при одинаковом и отличающемся потенциале на переплавляемом электроде и ТПК с целью получения не только минимального и равномерного проплавления основного металла, но и достижения высокой производительности процесса при хорошем формировании наплавленного слоя.

3. Рекомендовано вести процесс наплавки на первом этапе соединения металлов по технологии, когда переплавляемый электрод и ТПК имеют один и тот же потенциал. В дальнейшем, при наплавлении последующих слоев следует переходить на вторую электрическую схему подключения переплавляемого электрода (электрод и ТПК имеют отличающиеся потенциалы). Это позволит существенно повысить производительность наплавки при хорошем формировании наплавленного слоя.

4. По результатам выполненных исследований предложено выполнить более всестороннее изучение процесса торцевой ЭШН электродом большого сечения. В качестве рассматриваемых технологических показателей (как электрических, так и геометрических) выбраны схемы подключения электрода, количество используемых источников питания, вид применяемого тока, применение не только переплавляемых электродов, но и нетоковедущих расходимых заготовок, расположение наплавляемой поверхности по отношению к токоведущей секции ТПК.

5. Конечной целью проведенных и планируемых исследований является формирование банка данных для создания системы автоматического регулирования процесса торцевой ЭШН и получения повторяемости результатов качества наплавки.

Список литературы

1. Кусков Ю. М., Скороходов В. Н., Рябцев И. А., Сарычев И. А. (2001) *Электрошлаковая наплавка*. Москва, ООО «Наука и технологии».
2. Пономаренко В. П., Шварцер А. Я., Строганова Г. В. (1985) Исследование зоны сплавления высокохромистого чугуна с высокомарганцевистой сталью при электрошлаковой наплавке. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **11**, 55–58.
3. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. (1970). *Электрошлаковый переплав*. Москва, Металлургия.
4. Фрумин И. И., Ксендзык Г. В., Ширин В. С. (1980) *Аппарат для электрошлакового переплава и наплавки*. США, Пат. 4185682.
5. Кусков Ю. М. (2013) Электрошлаковая наплавка в секционном токоподводящем кристаллизаторе. *Сварщик*, **3**, 21–23.
6. Кусков Ю. М., Гордань Г. Н., Богайчук И. Л., Кайда Т. (2015) В. Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 34–37.

7. Kuskov Yu. M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding Journal*, **4**, 42–45.
8. Томиленко С. В., Кусков Ю. М. (1999) Энергетические особенности электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **2**, 51–53.

References

1. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A. et al. (2001) *Electroslag surfacing*. Moscow, LCC Nauka i Tekhnologii [in Russian].
2. Ponomarenko, V.P., Shvartser, A.Ya., Stroganova, G.V. (1985) Examination of fusion zone of high-chromium cast iron with high-manganese steel in electroslag surfacing. *Metallvedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **11**, 55–58 [in Russian].
3. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Frumin, I.I., Ksendzyk, G.V., Shirin, V.S. (1980) *Machine for electroslag remelting and surfacing*. USA Pat. 4185682.
5. Kuskov, Yu.M. (2013) Electroslag remelting in sectional current-supply mold. *Svarshchik*, **3**, 21–23 [in Russian].
6. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Bogajchuk, I.L. et al. (2015) Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 30–33.
7. Kuskov, Yu.M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding J.*, **4**, 42–45.
8. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (1999) Power specifics of electroslag process in current-carrying mold. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 51–53 [In Russian].

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловйов, В. О. Жданов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ТОРЦЕВЕ ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДОМ ВЕЛИКОГО ПЕРЕРІЗУ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Торцеве електрошлакове наплавлення запропоновано виконувати з використанням струмопідвідного кристалізатора (СПК) і введенням в його центральну частину, що переплавляється, електрода великого перерізу. При цьому запропоновані дві електричні схеми підключення електрода, що переплавляється. За першою схемою як до електрода, що витрачається, так і кільцевого невитратного (верхня секція СПК), підведений однаковий потенціал. За другою схемою потенціали на обох електродах відрізняються. В результаті проведених на флюсі АНФ-29 дослідних наплавлень в СПК діаметром 180 мм електродами зі сталі 40 діаметром 40...130 мм була запропонована наступна техніка виконання наплавлень. Після наведення в СПК шлакової ванни перший етап (з'єднання основного і наплавленого металів) рекомендується виконувати по першій електричній схемі. При цьому плавлення електрода буде уповільненим, але при оптимальній електричній потужності, що вводиться в шлакову ванну через СПК, можна досягти рівномірного проплавлення основного металу. Надалі, при наплавленні наступних шарів з підвищеною продуктивністю і гарною якістю наплавлюваного шару слід переходити на другу електричну схему підключення електрода, що переплавляється. Бібліогр. 8, рис. 5.

Ключові слова: торцеве електрошлакове наплавлення, електрод великого перерізу, струмопідвідний кристалізатор, електричні схеми електрошлакового наплавлення, проплавлення основного металу, формування наплавленого металу, продуктивність

Yu. M. Kuskov, V.G. Solovjev, V.A. Zhdanov

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

ELECTROSLAG SURFACING OF END FACES WITH LARGE-SECTION ELECTRODE IN CURRENT-CONDUCTING MOULD

It is proposed to perform electrosag surfacing of end faces with application of current-conducting mould (CCM) and feeding large-section remelting electrode into its central part. Two variants of electric circuits of remelting electrode connection are proposed. In the first circuit similar potential is applied both to consumable and annular nonconsumable (CCM upper section) electrodes. In the second circuit, potentials at both the electrodes

are different. The following technique of surfacing was proposed as a result of test surfacing performed with ANF-29 flux in CCM of 180 mm diameter with steel 40 electrodes of 40–130 mm diameter. After setting the slag pool in CCM, it is recommended to conduct the first stage (joining the base and deposited metal) with the first electric circuit. Electrode melting will be slower, but with optimum electric power applied to the slag pool through CCM, it is possible to achieve uniform penetration of base metal. Furtheron, at deposition of subsequent layers with higher productivity and good quality of the deposited layer, one should proceed to the second electric circuit of remelting electrode connection. 8 References, 5 Figures.

Keywords: end face ESS, large-section electrode; ESS electric circuits, base metal penetration, deposited metal formation, productivity

Поступила в редакцию 20.09.2017

Гибридные сварочные оболочки для аддитивного производства

При сварке титана и любого другого реакционноспособного металла для введения присадки важно, чтобы зона сварки была очищена от кислорода и азота до уровня, равного 10^{-5} (10 ppm) O_2 .

Благодаря более чем 40-летнему опыту в области производства гибких сварочных оболочек, Huntingdon Fusion Techniques (HFT) расширила свой диапазон по сравнению со стандартными круглыми оболочками, включив изготовление оболочек для охвата объемов 30 м³ и более для удовлетворения потребностей научно-исследовательских и производственных подразделений на международном уровне.



Ультрафиолетовый стабилизированный, прозрачный полимер с низким давлением паров, используемый для этих оболочек, является жестким и трудно повреждаемым. Для тех случаев, когда может произойти повреждение, существует ремонтный комплект, который входит в комплект поставки всех оболочек с условием, что дополнительные комплекты уже собраны и могут быть отправлены на следующий день, когда это потребуется.

Эти специально разработанные оболочки имеют герметичные молнии, размещенные где угодно, так чтобы они могли использоваться для доступа ко всем точкам входа. Входные точки аргона размещаются на уровне пола, что является хорошей практикой для продувки аргоном с соответствующими точками выхлопа в верхней части. Дополнительные клапанные порты доступны для добавления Weld Purge Monitors®, чтобы информировать пользователей, когда обеспечена сварочная безопасность, чтобы избежать риска окисления расходного материала.

Потолочные перчаточные отверстия встроены на этапе проектирования, и их можно интегрировать в любые требуемые положения вокруг корпусов.

Предоставляются панели обслуживания, обеспечивающие герметичную подачу всех необходимых шлангов, труб, входов и выходов для обеспечения подачи коммунальных услуг, таких как газ, электроэнергия, вода для обслуживания автоматических и ручных сварочных позиций.

Оболочки были изготовлены до настоящего времени для WAAM (Wire plus Arc Additive Manufacturing), и они подходят для ручной TIG (GTAW), а также для роботизированных методов TIG и лазерного осаждения.



УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДОВГОМІРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИКІВ СТАЛЬ 20 – СТАЛЬ 08X18H10T МЕТОДОМ ГАРЯЧОЇ ГВИНТОВОЇ ПРОКАТКИ У ВАКУУМІ*

Б. В. БОРЦ, І. М. НЕКЛЮДОВ, Н. Д. РИБАЛЬЧЕНКО, В. І. СИТІН, І. О. ВОРОБІЙОВ**

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

61108, м. Харків, вул. Академічна, 1. E-mail: nsc@kipt.kharkov.ua

Запропоновані та випробувані зміни в конструкції стану за допомогою гвинтової прокатки в каліброваних валках. Методом зварювання в твердій фазі на модернізованому вакуумному прокатному стані виготовлені довгомірні біметалічні перехідники з гвинтовою текстурою, що дозволяє отримувати якісне твердофазне з'єднання довжиною більше 200 мм зі сталі з низьким вмістом вуглецю і нержавіючої сталі 08X18H10T. За результатами досліджень розроблена технологія гвинтової прокатки в каліброваних валках. Бібліогр. 12, рис. 8.

Ключові слова: вакуумна гвинтова прокатка, довгомірний трубчатий елемент перехідника, біметалічні композиції, модернізація

Діючі атомні енергетичні установки другого і третього поколінь потребують підвищення надійності та продовження ресурсу експлуатації трубопроводів у з'єднаннях різномірних металів, які розрізняються складом і властивостями, таких як низьковуглецеві сталі з аустенітними. До теперішнього часу такі з'єднання виконуються на атомних станціях методом зварювання плавленням, і як відомо, найбільш схильні до корозійного руйнування.

У ННЦ ХФТІ в 2010–2012 роках при виконанні комплексної програми «Ресурс» розроблені нові засоби зварювання композиційних матеріалів у твердій фазі методом гарячої вакуумної прокатки на листовому прокатному стані ДУО-170 виробництва ХФТІ [1, 2].

Розроблена технологія пакетної прокатки композиційних матеріалів сталь 20 – сталь 08X18H10T дозволяє виготовляти кільцеві перехідникові вставки різних діаметрів, які впроваджені на довгострокові випробування в турбінне відділення Запорізької атомної станції (ЗАЕС) та показали працездатність в натурних умовах експлуатації.

На підставі розробленої технології отримання нового композиційного матеріалу складена, узгоджена та затверджена в 2013 р. в ДП НАЕК «Енергоатом» «Программа аттестационных испытаний композиционных сварных соединений сталь 20 – сталь 08X18H10T, изготовленных по технологии сварки в твердой фазе» [3].

В процесі виконання комплексної програми «Ресурс» визначено, що композиційні перехідникові вставки, виготовлені пакетним способом, не в повній мірі задовольняють потреби технічної документації АЕС ПНАЭ Г-7-008-89 зі зварювання різномірних металів.

На підставі цих відхилень від затверджених вимог технологічної документації АЕС обґрунтована можливість модернізації наявного устаткування для вакуумної гвинтової прокатки в каліброваних валках довгомірних перехідникових елементів з композиту сталь 20 – сталь 08X18H10T діаметром 30 мм та довжиною більше 200 мм.

Аналіз дослідних зразків довгомірних перехідників виявив ряд недоліків в прокатаних заготовках на стані ДУО-170, що змусило розробити креслення на конструкцію більш потужного нового стану ДУО-175-2 з допоміжною модернізацією для усунення цих недоліків.

Деформація металу і контактні напруги при прокатці в калібрах. Процеси прокатки відносяться до числа високоефективних економічних способів одержання металевих виробів. Подальший розвиток і вдосконалення цих процесів вимагає комплексного вивчення параметрів прокатки і створення оптимальних умов роботи обладнання.

У зв'язку з цим доцільно розглянути розподіл деформації та контактних напружень при прокат-

* Публікується за матеріалами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс») у 2013–2015 рр.

** В роботі приймали участь І. М. Короткова, О. О. Лопата, О. Т. Лопата.

ці в калібрах валків прокатних станів, встановити закономірності зміни контактних дотичних напружень і отримати залежності для визначення контактної і повного тиску металу на валки, крутного моменту і положення нейтрального перерізу при прокатці в калібрах. Необхідно провести розрахунок контактної площі при прокатці в простих і складних калібрах, а також вивчити вплив зовнішніх зон на контактний тиск при прокатці в калібрах, коли $l/h_{\text{ср}} < 1,5$ (l — довжина геометричного осередку деформації; $h_{\text{ср}}$ — середня висота осередку деформації).

В результаті виконаних комплексних досліджень промислових прокатних станів [4–6] встановлені величини тиску металу на валки, крутні моменти, енергетичні параметри, випередження, знос калібрів і точність розмірів прокату. Виявлено резерви прокатних станів та запропоновано рекомендації щодо вдосконалення технології прокатки сортової сталі.

Розроблені заходи збільшують продуктивність прокатного обладнання, підвищують якість і точність розмірів прокату.

Модернізація стана. Модернізація стана полягала у визначенні оптимального калібрування бочок валків стану для прокатки круглої заготовки діаметром 30 мм, розробці креслень і виготовленні нових валків з проточками спочатку під 14,8 мм і доведення напівдугую проточок до 15,5 мм, щоб забезпечити в прокатаній і обробленій на токарному верстаті заготовці чистовий діаметр 30 мм. Зміни в розмірах проточок були викликані занадто великим облоєм металу на горизонтальному роз'єднанні калібрів валків. Як з'ясувалося, після перших експериментів по прокатці довгомірного перехідника стан не володіє необхідною жорсткістю (сумарна деформація і прогин валків, гвинтова передача упорного гвинта). Номінальний

зор між бочками валків, зведених до металевого контакту, повинен становити 0,5...1 % діаметра бочки, тобто в середньому до 1 мм. На стані фактично віддача валків виявилася до 2,3 мм. В результаті чого зовнішній шар нержавіючої сталі пішов в облой і порушилася рівномірність зовнішнього шару композиту.

В результаті аналізу дослідних зразків виявлені відмінності в ступені деформації по поперечному перерізі перехідника. Нерівномірність деформації визначалась за даними мікротвердості складових, замірених на темплетях поперечного перерізу перехідникової прокатаної заготовки композиту сталь 20 – 08X18H10T. Мікротвердість замірялась за методом Віккерса при навантаженні 25 г на приладі LM 700AT фірми «LECO». Нерівномірність деформації складових по перетину заготовки визначалась також шляхом замірів величини зерен складових до направлення прокатки [2, 7].

З метою зменшення виявлених недоліків у процесі вдосконалення технології отримання довгомірних перехідникових елементів передбачено проводити обтиснення із забезпеченням гвинтової прокатки, що створює отримання гвинтової текстури. Для цього розроблені креслення, виконано в металі та змонтовано на стані установку валків з калібрами не традиційно в положенні, перпендикулярному по відношенню до напрямку прокатки, а кожен валок повернуто під кутом 2° до осі розміщення валків в стані ДУО-170 і розгорнуті в протилежні сторони (рис. 1, 2).

Таким чином валки виявилися поверненими один до іншого на 4° , що має змусити заготовку додатково обертатися щодо своєї осі в процесі поступального руху в момент прокатки. Це має призвести до зменшення виходу матеріалу в облой за рахунок збільшення зони його зміщення текстури по гвинтовій лінії (рис. 3, 4).

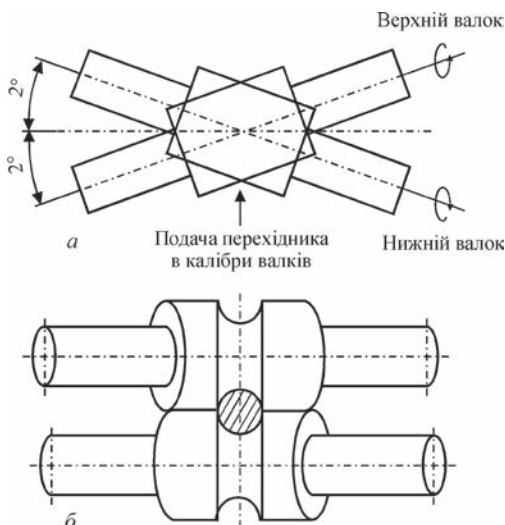


Рис. 1. Схема розміщення валків: а — вид в плані; б — вид з торця

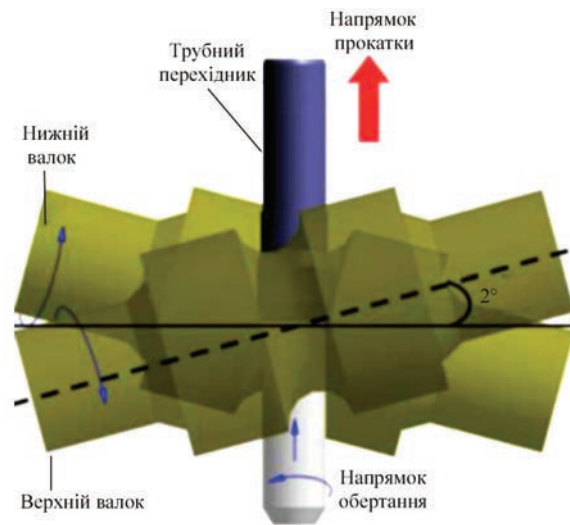


Рис. 2. Зовнішній вигляд розміщення валків та напрямки руху під час прокатки (вид зверху)

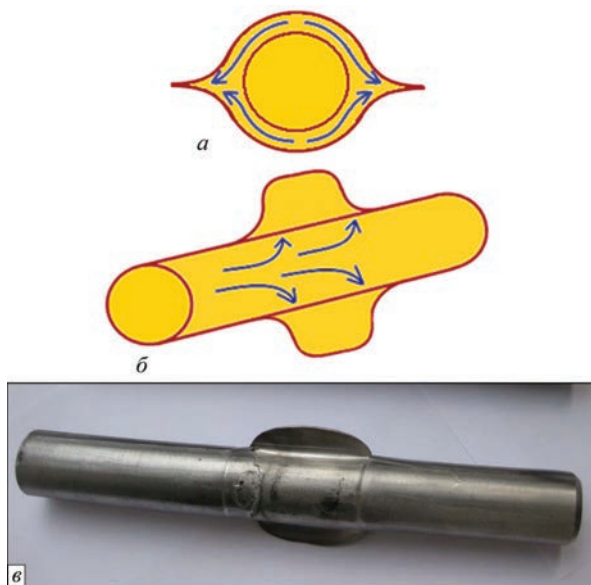


Рис. 3. Напрямок течії металу (а, б — схема з торця зразку) з використанням паралельних валків (в)

Зміни положення валків призвели до додаткових змін у конструкції вхідної і вихідної провідок (див. рис. 5), які були виготовлені з урахуванням виникаючих зусиль крутного моменту на зразок при русі заготовки, що прокатують, а також до істотної зміни конструкції кріплення подушок валків з підшипниками.

Додатково зроблено конструктивні зміни у заготовці перехідника, а саме: дві проточки спочатку циліндричні, а надалі конічні і конструкція кінця заготовки стрижня зі сталі 20 з метою більш щільного закріплення його в тілі вихідної заготовки. Ці зміни виключають можливість виштовхування стрижня заготовки в перший момент початку прокатки при вході в калібри валків.

На відміну від попередніх експериментів, при яких прокатка здійснювалася на стані без гвинтового руху, на стані з гвинтовою прокаткою валками вхідний конус на заготовці перехідника був змінений з 45° на 25° для кращого захоплення заготовки валками.

Виготовлення зразків довгомірного перехідника за вдосконаленою технологією та контроль якості. Для оцінки працездатності стану під час прокатки за новою методикою довгомірних перехідникових елементів в валках з винто-

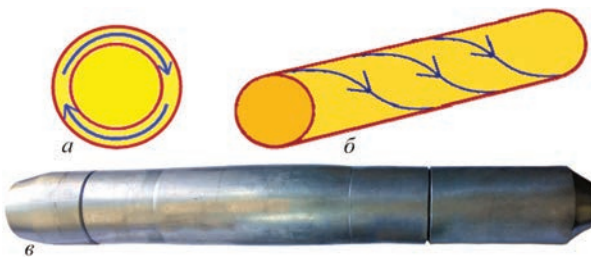


Рис. 4. Напрямок течії металу при гвинтовій прокатці з використанням гвинтової текстури: а — вид з торця зразка; б — загальний вигляд текстури; в — тестовий зразок з алюмінію

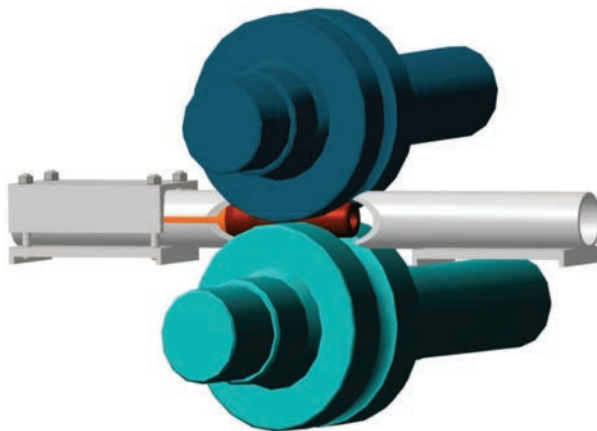


Рис. 5. Зовнішній вигляд розміщення валків з провідками вою прокаткою, проведено тестові випробування на модельному матеріалі — алюмінії. Заготовка виготовлялася за кресленнями композиційного перехідника.

Апробація нової технології прокатки підтвердила можливість отримання осьового обертання заготовки в поєднанні з одночасним поступовим її рухом у процесі прокатки при твердофазному з'єднанні складових перехідника.

Як показали експерименти прокатка довгомірного перехідника за вдосконаленою технологією з гвинтовою прокаткою виявилася вірною.



Рис. 6. Довгомірний трубчатий елемент, виготовлений на стані ДУО-175-2: а — до прокатки; б — після прокатки та обробки

Отримані експериментальні зразки мали гвинтову текстуру, що забезпечує рівномірне обтиснення матеріалу по всьому периметру заготовки в місцях твердофазного з'єднання двох різнорідних матеріалів (рис. 6).

Проведення неруйнівного ультразвукового контролю отриманих довгомірних трубних перехідників сталь 20 – 08X18H10T. Серед безліч методик [8] проведення ультразвукового контролю (УЗК) вибір тієї чи іншої повинен враховувати максимальну можливість виявлення дефектів. Зовнішній вигляд контрольованого зразку представлений на рис. 6, б. В роботі використовували ультразвуковий дефектоскоп УД4-76.

Для довгомірних трубчатих перехідників сталь 20 – 08X18H10T обрані дві методики: ехо-метод, з використанням суміщених прямих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП), з частотою 2,5 МГц, і ехо-дзеркальний метод.

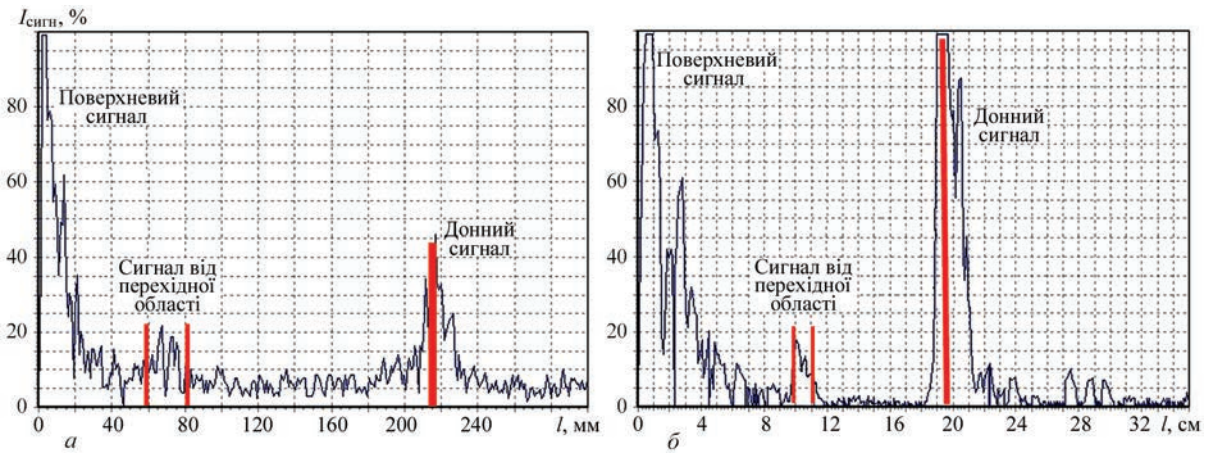


Рис. 7. Осцилограма перехідної області контрольного зразка сталь 20 – 08X18N10T (ехо-метод): а — з боку сталі 08X18N10T; б — з боку сталі 20

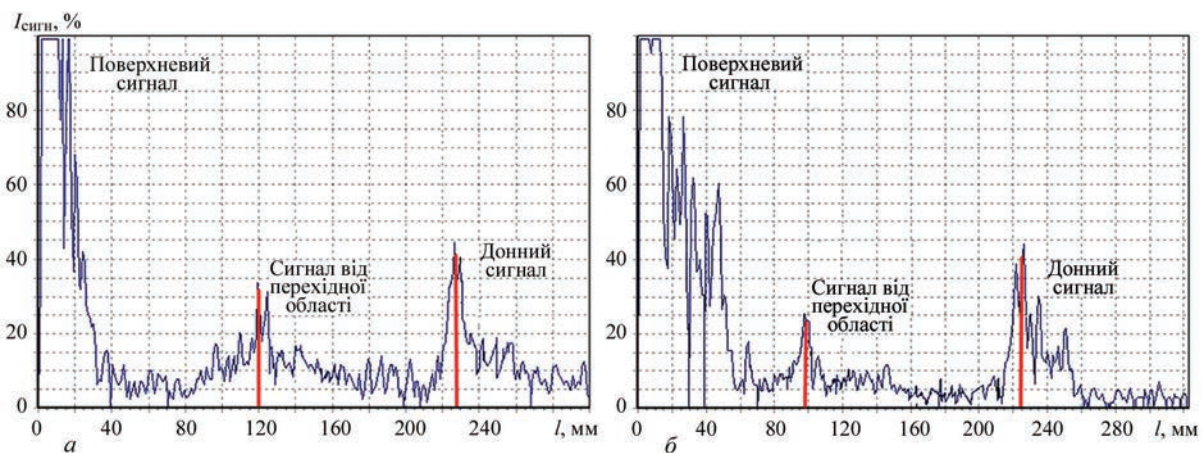


Рис. 8. Осцилограма перехідної області контрольного зразка сталь 20 – 08X18N10T (ехо-дзеркальний метод): а — з боку сталі 08X18N10T; б — з боку сталі 20

Перед проведенням УЗК прилад проходив калібрування на тестовому еталонному дефектному та бездефектному зразках з використанням як прямих, так і похилих ПЕП. У разі наявності дефекту при використанні УЗК ехо-дзеркальним методом, амплітуда сигналу перехідної області буде вище амплітуди перехідної зони бездефектного еталонного тест-зразка. У разі використання ехо-методики УЗК сигнал перехідної області повинен порівнюватися з донним сигналом зразка, що досліджується. Про наявність дефекту свідчитиме амплітуда донного сигналу, яка перевищує амплітуду сигналу перехідної області.

Результати УЗК довгомірних трубчатих перехідників ехо-методом представлені на рис. 7, а ехо-дзеркальним методом на рис. 8. Як видно на осцилограмах дефектів в тілі і на межі складових відсутні дефекти у вигляді тріщин, порожнин і незварних ділянок.

Розробка технологічної інструкції зі зварювання в твердій фазі довгомірних перехідників з зовнішньою втулкою зі сталі 08X18N10T та внутрішнього стрижня зі сталі 20. Для відповідності вимогам технологічної документації АЕС ПНАЭ Г-7-008-89 [9] розроблена технічна

документація з виготовлення довгомірних композиційних перехідників, яка містить технологічну інструкцію по порядку роботи зі з'єднання перехідникових елементів різномірних металів в твердій фазі методом гарячої вакуумної прокатки. Відповідно до вимог прописано серію обов'язкових випробувань з контролю якості.

В інструкції надано перелік таких етапів виготовлення:

- процес підготовки вихідних матеріалів: механічна обробка втулки та стрижня зі сталі 20 перед складанням в вихідну заготовку до прокатки та зборка пакетів під прокатку;
- процес з'єднання елементів перехідника на вакуумному прокатному стані ДУО-175;
- вимоги безпеки в процесі з'єднання складових композиційних перехідників;
- заключні операції після отримання перехідникового елементу;
- контроль якості з'єднання складових в готовому виробі.

Оскільки основними умовами отримання композиційних перехідників було забезпечення високої міцності та герметичності при оцінці якості отриманих виробів, орієнтувалися на основний документ

вимог правил контролю (ПК) для обладнання і трубопроводів атомних енергетичних установок, зварні з'єднання і наплавлення ПНАЭ Г-7-010-89 [10].

Дані ПК є керівним матеріалом при проектуванні, конструюванні, виготовленні, монтажі обладнання і трубопроводів та встановлюють порядок, види, обсяги і методи контролю та норми оцінки якості зварних з'єднань і наплавлених деталей (виробів).

Згідно вимог ПК за ПНАЭ Г-7-010-89 для виробів передбачені такі види випробувань:

1. Неруйнівний метод ультразвукового контролю по поверхні в місці з'єднання шарів різновидних металів згідно з ГОСТ 14782-86 [11].

2. Контроль герметичності шляхом гідравлічних випробувань при наповненні рідиною під тиском (водою) внутрішньої частини трубої заготовки і витримці під тиском до 200 бар протягом доби.

3. Механічні випробування на міцність при зсуві шарів складових композиту згідно з ГОСТ 14759-69 [12] для клейових з'єднань листових матеріалів.

4. Металографічні дослідження щільності і протяжності межі з'єднання, а також товщини шарів і ступеня деформації структури в зоні з'єднання складових металів.

Контроль якості: за пунктом 1 проходять 100 % перехідників від партії; за пунктом 2 (гідравлічні випробування на герметичність) один зразок від партії після 100 % УЗК; за пунктами 3, 4 проходять по одному виробу від партії перехідників.

Висновки

1. Розроблена і модернізована конструкція вузлів прокатного стану, що дозволила отримувати довгомірні трубні перехідники для АЕС за допомогою обертання трубного перехідника при прокатці.

2. Зразки-макети довгомірних трубних перехідників після прокатки показали наявність гвинтової текстури уздовж поверхні зразку, а також відсутність кривизни заготовок при використанні модернізованих валків, встановлених під кутом один до одного.

3. Конструювання, виготовлення і додаткова модернізація нового, більш потужного вакуумного стану ДУО-175-2 взамін значно зношеного стану ДУО-170 дає можливість отримати більш якісні довгомірні перехідникові елементи зі сталі 20 з нержавіючою сталлю типу 08X18H10T, які плануються до впровадження на атомних станціях.

4. Неруйнівний ультразвуковий контроль показав відсутність дефектів в тілі і на межі складових.

5. Розроблені методики контролю якості перехідникових елементів згідно з правилами контролю «Обладнання та трубопроводи атомних енергетич-

них установок, зварні з'єднання і наплавлення, правила контролю» (ПНАЭ Г-7-010-89) та підготовлена технологічна інструкція зі зварювання в твердій фазі довгомірних перехідників з зовнішньою втулкою зі сталі 08X18H10T та внутрішньою зі сталі 20.

Список літератури

1. Земзин В. Н. (1991) Сварные соединения разнородных сталей. *Сварка и свариваемые материалы*. Т. 1. Москва, Металлургия, сс. 422–442.
2. Борц Б. В., Воеводін В. М., Неклюдов І. М. (2012) Підвищення ресурсу експлуатації трубопроводів АЕС за рахунок застосування довгомірних композиційних вставок з різновидних матеріалів. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Київ, Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона, сс. 154–158.
3. Шавлаков А. В. и др. Программа аттестационных испытаний композитных сварных соединений сталь 20 – сталь 08X18H10T, изготовленных по технологии сварки в твердой фазе. Лист № 15-31/4323. Утв. 25.06.2013.
4. Целиков А. И. (1962) *Теория расчета усилий в прокатных станах*. Справочник. Москва, Металлургиздат.
5. Тарновский И. Я., Леванов А. Н., Поксеваткин М. И. (1956) *Деформация металлов при прокатке*. Свердловск, Металлургиздат.
6. Полухин П. И., Воронцов В. К., Кудрин А. Б., Чиченев Н. А. (1974) *Деформации и напряжения при обработке металлов давлением*. Москва, Металлургия.
7. Борц Б. В., Воеводін В. Н., Неклюдов І. М. и др. (2013) Применение твердофазных соединений для повышения надежности трубопроводов реакторов 2 и 3 поколения. *Наука та інновації*, 9(2), 10–17.
8. Самойлович Г. Ф. (1976) *Неразрушающий контроль металлов и изделий*. Справочник. Москва, Машиностроение.
9. ПНАЭ Г-7-008-89. (ДНАОП 0.04-1.05-90) *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*.
10. ПНАЭ Г-7-010-89. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок, сварные соединения и наплавки, правила контроля*.
11. ГОСТ 14782-86. *Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые*.
12. ГОСТ 14759-69. *Клей. Метод определения прочности при сдвиге*.

References

1. Zemzin, V.N. (1991) Welded joints of dissimilar steels. In: *Welding and welded materials*. Vol. 1. Moscow, Metallurgiya, pp. 422-442 [in Russian].
2. Borts, B.V., Boevodyn, V.M., Neklyudov, I.M. (2012) Increase of service life of NPP piping due to application of the elongated composite inserts from dissimilar materials. In: *Problems of life and safety service of structures, constructions and machine*. Kiev, PWI, pp. 154-158 [in Ukrainian].
3. Shavlakov, A.V. et al. Program of qualification test of composite welded joints of steel 20-steel 08Kh18N10N produced by technology of solid phase welding. Sheet 15-31/4323. Approv. 25.06.2013 [in Russian].
4. Tselikov, A.I. (1962) *Theory of calculation of efforts in rolling mills*. In: Refer. book. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
5. Tarnovsky, I.Ya., Levanov, A.N., Poksevatkin, M.I. (1956) *Deformation of metals in rolling*. Sverdlovsk, Metallurgizdat [in Russian].
6. Polukhin, P.I., Vorontsov, V.K., Kudrin, A.B. et al. (1974) *Strains and stresses in metal forming*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Borts, B.V., Voevodin, V.N., Neklyudov, I.M. et al. (2013) Application of solid-phase bonding to increase the reliability of pipelines of generation 2 and 3 reactors. *Nauka innov.*, 9(2), 10-17 [in Russian].

8. Samojlovich, G.F. (1976) *Nondestructive testing of metals and products*. In: Refer. book. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. PNAE G-7-008-89 (DNAOP 0.04-1.05-90): *Rules of arrangement and safety service of equipment and piping of nuclear power plants* [in Russian].
10. PNAE G-7-010-89: *Equipment and piping of nuclear power plants, welded joints and deposits, rules of inspection* [in Russian].
11. GOST 14782-86: *Nondestructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods* [in Russian].
12. GOST 14759-69. *Glues. Method of determination of shear strength* [in Russian].

Б. В. Борц, И. М. Неклюдов, Н. Д. Рыбальченко,
В. И. Сытин, И. А. Воробьев

ННЦ «Харьковский физико-технический институт»
НАН Украины. 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1.
E-mail: nsc@kipt.kharkov.ua

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ СТАЛЬ 20 – СТАЛЬ 08X18N10T МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ В ВАКУУМЕ

Предложены и опробованы изменения в конструкции стана с помощью винтовой прокатки в калиброванных валках. Методом сварки в твердой фазе на модернизированном вакуумном прокатном стане изготовлены длинномерные биметаллические переходники с винтовой текстурой, позволяющие получать качественное твердофазное соединение, длиной

более 200 мм из стали с низким содержанием углерода и нержавеющей стали 08X18N10T. По результатам исследований разработана технология винтовой прокатки в калиброванных валках. Библиогр. 12, рис. 8.

Ключевые слова: вакуумная винтовая прокатка, длинномерный трубчатый элемент переходника, биметаллические композиты, модернизация

B.V. Borts, I.M. Neklyudov, N.D. Rybalchenko,
V.I. Sytin, I.O. Vorobiov

NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»
of the NAS of Ukraine.

1 Academichna Str., 61108, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: nsc@kipt.kharkov.ua

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF PRODUCING EXTENDED COMPOSITE TRANSITION PIECES OF STEEL 20 – STEEL 08Kh18N10T MADE BY THE METHOD OF HOT SCREW ROLLING IN VACUUM

Changes in mill design using screw rolling in calibrated rolls were proposed and tested. Solid-phase welding in upgraded vacuum rolling mill was used to produce extended bimetal transition pieces with a helical texture that allows making sound solid-phase joints of more than 200 mm length of low-carbon steel and 08Kh18N10T steel. Investigation results were used to develop the technology of screw rolling in calibrated rolls. 12 Ref., 8 Fig.

Keywords: vacuum screw rolling, extended tubular element of the transition piece, bimetal composites, upgrading

Надійшла до редакції 02.10.2017

Украина и Китай усиливают сотрудничество в проектах возобновляемой энергетики

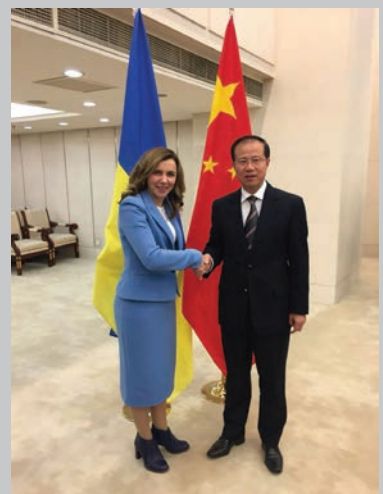
Вопросы сотрудничества в проектах возобновляемой энергетики обсуждались на пленарном заседании украинско-китайской подкомиссии по торгово-экономическому сотрудничеству в Министерстве коммерции КНР 17 ноября в Пекине.

Украинскую делегацию представила заместитель министра экономического развития и торговли Украины Наталья Никольская совместно с представителями Минагрополитики, МИД, Минэкономразвития, Мининфраструктуры, Госэнергоэффективности, Государственного инновационного финансово-кредитного учреждения, посольства Украины в Китае.

В ходе переговоров председатель Госэнергоэффективности Сергей Савчук охарактеризовал перспективные пути двустороннего сотрудничества в «чистой» энергетике:

- ▶ реализация совместных инвестиционных проектов,
- ▶ строительство заводов по производству оборудования и материалов для объектов возобновляемой энергетики,
- ▶ создание механизмов финансирования проектов «чистой» энергетики.

Китай — мировой лидер в наращивании мощностей возобновляемой энергетики. Это, в свою очередь, сказывается на глобальных тенденциях развития «чистой» энергетики. Так, по данным Международного энергетического агентства, с 2010 г. стоимость производства солнечной и ветровой энергии снизилась, соответственно, на 70 и 25 %. Это ускорило строительство солнечных и ветровых станций в других странах, в том числе в Украине.



ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛА КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛЕГИРОВАННЫХ БЕЙНИТНЫХ СТАЛЕЙ

С. И. МОРАВЕЦКИЙ¹, А. К. ЦАРЮК¹, А. В. ВАВИЛОВ², А. Г. КАНТОР²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ПАО «Турбоатом». 61037, г. Харьков, Московский просп., 199. E-mail: office@turboatom.com.ua

Сформулирован возможный подход в разработке технологии изготовления комбинированных сварных соединений бейнитных сталей применительно к ответственным сварным узлам, основанный на целенаправленном задании оптимального содержания легирующих элементов и примесей в основном и присадочном металле в рамках их марочного состава по нормативным документам и способствующий повышению их эксплуатационных характеристик. Сравнение результатов экспериментальных исследований, полученных в рамках стандартной аттестации технологии сварки, позволяет предположить об эффективности реализованного подхода. Библиогр. 9, табл. 2.

Ключевые слова: легированная сталь, роторная сталь, комбинированные сварные соединения, сварочные материалы, химический состав, сварка под флюсом, термическая обработка, отпускная хрупкость, ударная вязкость

В ПАО «Турбоатом» создана паровая турбина нового поколения К-325-23,5, отвечающая современным требованиям по надежности, экономичности и маневренности [1]. Для этой турбины спроектирован сварнокованный комбинированный ротор цилиндра среднего давления, работающий в высоко- и низкотемпературном режиме [2]. Часть ротора, работающая в высокотемпературном режиме (1–11 ступень), изготавливается из стали ЭИ 415 (20Х3МВФА). Часть ротора, работающая в низкотемпературном режиме (12–16 ступени), изготовлена из стали 25Х2НМФА. Эти стали принадлежат к одному структурному классу, но отличаются системой легирования. В стали ЭИ 415 содержание никеля в 2,6 раза ниже, чем в 25Х2НМФА, а хрома — в 1,5 раза выше. Кроме того, сталь ЭИ 415 содержит сильные карбидообразующие элементы ванадий и вольфрам. Благодаря указанным особенностям легирования сталь ЭИ 415 имеет более высокую фазовую стабильность при повышенных температурах, что определяет ее выбор для изготовления участка ротора, работающего в высокотемпературном режиме.

Ранее разработана технология получения комбинированного сварного соединения сталей ЭИ 415 и 25Х2НМФА (далее — соединение ЭИ 415 + 25Х2НМФА) с использованием проволоки марки Union S 3 NiMoCr (тип А-S 55 4 по ISO 26304) в сочетании с флюсом марки UV 420 TT (тип SA FB 1 65 DC по ISO 14174). В основу ее положен подход, в соответствии с которым получают однородные сварные соединения стали 25Х2НМФА: заполнение U-образной разделки постоянной ширины способом многопроходной сварки под

флюсом с предварительным подогревом основного металла до 350 °С и послесварочный высокий отпуск 40 ч при температуре 630 °С. Однако результаты исследовательской аттестации этой технологии показали, что температура отпуска, оптимальная для металла зоны сплавления шва со сталью 25Х2НМФА, оказалась недостаточной для обеспечения требуемой ударной вязкости металла зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 независимо от применяемых сварочных материалов [2]. Так, при температуре 20 °С среднее значение KCV металла сварного соединения шов — сталь ЭИ 415 (надрез по зоне сплавления) составило 42 Дж/см². Это значение ниже требуемого значения ударной вязкости (≥ 59 Дж/см²) для металла однородных сварных соединений стали 25Х2НМФА, установленного технической документацией на изготовление роторов турбин и априори распространенного на соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА.

Поэтому дальнейшей целью было изыскание технологических возможностей для повышения KCV металла зоны сплавления на стали ЭИ 415 до требуемого значения. При этом желательно сохранить отличающийся простотой процесс сварки сталей 25Х2НМФА и ЭИ 415 между собой как однородного соединения (без предварительной наплавки на кромку основного металла, промежуточной термообработки и т. п.). Для достижения указанной цели проводился анализ ранее полученных результатов исследовательской аттестации технологии сварки соединений ЭИ 415 + 25Х2НМФА [2] в сопоставлении с конкретными условиями сварки аттестуемого контрольного сварного соединения (КСС) и известными закономерностями измене-

ния механических свойств при отпуске легированных сталей.

Результаты исследований [3–6] позволяют предположить, что наиболее вероятной причиной пониженной ударной вязкости зоны сплавления на стали ЭИ 415 является отпускная хрупкость. Известно отрицательное влияние вредных примесей, прежде всего фосфора, на склонность низко- и среднелегированных сталей к охрупчиванию. Особенно резко проявляется вредное влияние фосфора, вводимого совместно с марганцем при содержании последнего 1 % и выше. Подобно марганцу, увеличивает склонность сталей к отпускной хрупкости также и кремний, причем рост содержания кремния расширяет опасный интервал в сторону высоких температур.

Обобщенно, для большинства рассматриваемых сталей, температурным интервалом развития явлений отпускной хрупкости может считаться 250...650 °C [4–6]. Внутри этого интервала находятся температуры предварительного и сопутствующего подогрева, при которых обычно ведут сварку роторных сталей с целью получения в металле ЗТВ минимального содержания продуктов бездиффузионного распада аустенита и предупреждения замедленного разрушения сварных соединений.

При отпуске сварных соединений роторных сталей также невозможно избежать их пребывания в опасном интервале температур, поскольку для толстостенных крупногабаритных сварных узлов после выдержки при температуре отпуска возможно только медленное охлаждение с печью. Поэтому, в принципе, для любого участка сварного соединения любой роторной стали после термообработки неизбежно некоторое охрупчивание и соответствующее снижение ударной вязкости по сравнению с тем уровнем, который был бы достигим при ускоренном охлаждении роторов после отпуска.

В случае проведения отпуска сварного соединения роторной стали при оптимальной температуре (выше температурного интервала охрупчивания этой стали) конечная степень охрупчивания металла сварного соединения получается невысокой, так как определяется лишь временем выдержки в опасном интервале при остывании изделия с печью. Это подтверждает практика получения однородных сварных соединений стали 25Х2НМФА, после отпуска которых при 630 °C в течение 40 ч требование к ударной вязкости KCV (≥ 59 Дж/см²) металла зоны сплавления обеспечивается с заметным запасом. В то же время для стали ЭИ 415 нижний предел рекомендуемых температур отпуска по ТУ 108-1029-81 составляет 660 °C. Поэтому можно предположить, что принятая температура отпуска соединений ЭИ 415 +

+ 25Х2НМФА (630 °C) входит в опасный интервал для стали ЭИ 415. В этом случае металл зоны сплавления на стали ЭИ 415 находится в опасном интервале на всех стадиях получения сварного соединения (предварительный и сопутствующий подогрев при сварке; транспортировка в печь; нагрев, выдержка при температуре высокого отпуска и остывание с печью). Тогда и выявляемые механическими испытаниями пониженные значения ударной вязкости металла зоны сплавления на стали ЭИ 415 в комбинированном соединении являются, по-видимому, закономерным результатом его многочасовой выдержки в широком интервале температур, в котором в стали ЭИ 415 может развиваться совокупность явлений отпускного охрупчивания различной природы.

Устранить охрупчивание стали ЭИ 415 и металла всех зон ее сварного соединения может лишь отпуск выше опасного интервала, т. е. при рекомендуемых для нее температурах (≥ 660 °C). Но проведение послесварочного отпуска соединений ЭИ 415 + 25Х2НМФА при температурах ≥ 660 °C недопустимо, поскольку ведет к разупрочнению стали 25Х2НМФА [6], температура отпуска которой по ТУ 108-995-81 630...650 °C. При отсутствии возможности повысить температуру послесварочного отпуска комбинированного ротора остается лишь возможность воздействовать на другие факторы, определяющие склонность стали ЭИ 415 к отпускному охрупчиванию, ее химический состав и длительность пребывания металла в опасном интервале.

Особенностями стали ЭИ 415, выбранной для изготовления высокотемпературной части комбинированного ротора паровой турбины К-325-23,5 для Углегорской ТЭС, в отличие от стали, использованной в ранее аттестуемом КСС [2], было весьма низкое содержание фосфора и сведенное к минимуму содержание кремния (табл. 1).

Длительность пребывания металла комбинированного сварного соединения в наиболее опасной области интервала охрупчивания стали ЭИ 415 сокращена установлением жестких требований к температуре сопутствующего подогрева, контролю во время сварки температуры основного металла в окрестности разделки и активному ее регулированию за счет изменения мощности нагревательного устройства с целью предотвращения перегрева. Как правило, назначают нижний предел температуры предварительного и сопутствующего подогрева комбинированного сварного соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА — 350 °C. При положительной температуре окружающей среды в ходе непрерывной автоматической сварки кольцевого соединения температура металла вследствие автоподогрева довольно скоро начина-

ет превышать назначенную. Ввиду представления о требуемой температуре предварительного подогрева стали ЭИ 415 (400...500 °С), которое давно сложилось в практике сварки однородных соединений этой стали [7, 8], эффект автоподогрева металла соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА до сих пор не считался нежелательным. Поэтому в процессе заполнения глубокой разделки температура сопутствующего подогрева металла шва и прилегающих к нему участков основного металла могла длительно составлять 400...450 °С или выше. Главным образом это касается натурной модели ротора, содержащей КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА, на котором воспроизводят аттестуемый процесс сварки. Различия в массогабаритных показателях и теплоемкости ротора и его натурной модели способствуют особенно сильному перегреву последней (до максимальных значений указанного выше интервала температур).

Между тем, с точки зрения известных фактов, поддержание металла свариваемого соединения легированных сталей в этом интервале может вести к нежелательным последствиям. Во-первых, он входит в интервал обратимой отпускной хрупкости сталей 375...575 °С [5]. Во-вторых, вследствие чрезмерно низкой скорости охлаждения $w_{6/5}$ и завышенной температуры распада аустенита могут происходить неблагоприятные изменения состава продуктов распада. Стабилизируется γ -фаза и растет содержание остаточного аустенита. Кроме бейнита и мартенсита также может появляться феррит [9]. Это означает не что иное, как повышение степени микрохимической (фазовой) неоднородности металла участка перегрева и отрицательно сказывается на его механических свойствах и склонности к замедленному разрушению.

Поэтому в рамках производственной аттестации технологии (перед сваркой ротора для Углегорской ТЭС) в ходе сварки КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА измерение температуры сопутствующего подогрева сочетали с изменением мощности пламени газово-

го нагревателя (по мере необходимости). Благодаря регулированию мощности газового нагревателя все значения температуры предварительного и сопутствующего подогрева металла КСС, измеренные во время многопроходной сварки, находились в интервале 316...365 °С.

Таким образом, все изменения в ранее разработанной технологии сварки соединений ЭИ 415 + 25Х2НМФА заключались лишь в указанном ограничении сверху интервала температур сопутствующего подогрева и различиях в химическом составе основного металла стали ЭИ 415 в аттестуемых КСС, представленных в табл. 1. Другие условия и параметры технологии сварки, методы исследования механических свойств металла КСС, схемы вырезки образцов для испытаний на ударный изгиб оставались неизменными и подробно описаны в работе [2].

Результаты оценки ударной вязкости участков металла КСС, полученного в ходе производственной аттестации измененной технологии сварки, приведены в табл. 2 в сравнении с аналогичными результатами исследовательской аттестации [2]. Совокупное влияние изменения температуры сопутствующего подогрева и содержания кремния и фосфора в основном металле стали ЭИ 415 оказалось достаточно эффективным. Среднее значение ударной вязкости металла сварного соединения (надрез по зоне сплавления шва и стали ЭИ 415) повысилось почти в два раза. Разницу в содержании фосфора и особенно марганца в металле шва КСС, аттестуемого по измененной технологии, в сравнении с аналогичными значениями по результатам исследовательской аттестации (табл. 1) можно считать пренебрежимо малой. Тогда отмеченное повышение на 68 % среднего значения KCV металла шва (надрез по высоте шва) можно объяснять почти исключительно за счет благоприятного влияния измененного теплового режима многопроходной сварки.

Полученные значения KCV с надежным запасом удовлетворяют требование к ударной вяз-

Таблица 1. Содержание элементов в стали ЭИ 415 (ТУ 108-1029-81) в составе КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА и металлах швов, мас. %

Объект контроля	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr
Сталь ЭИ 415 по ТУ 108-1029-81	0,17...0,24	≤ 0,40	0,25...0,60	≤ 0,50	≤ 0,25	2,40...3,30
Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2]	0,22	0,27	0,32	0,30	0,12	3,14
Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2014 г.	0,23	0,059	0,35	0,38	0,15	2,71
Металл шва в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2]	0,088	0,32	1,61	2,31	-	0,44
Металл шва в КСС, аттестуемом в 2014 г.	0,088	0,37	1,41	2,31	-	0,72

Продолжение табл. 1.

Объект контроля	Mo	V	W	S	P
Сталь ЭИ 415 по ТУ 108-1029-81	0,35...0,55	0,45...0,70	0,30...0,50	≤ 0,022	≤ 0,025
Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2]	0,40	0,66	0,40	0,010	0,012
Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2014 г.	0,41	0,50	0,32	0,003	0,005
Металл шва в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2]	0,60	-	-	0,009	0,022
Металл шва в КСС, аттестуемом в 2014 г.	0,50	0,018	-	0,012	0,017

Таблица 2. Результаты испытаний* на ударный изгиб при температуре 20 °С металла КСС ЭИ 415 + 25X2НМФА, Дж/см²

Место выполнения острого надреза	Технологические условия получения сварного соединения ЭИ 415 + 25X2НМФА	
	Сталь ЭИ 415 среднестатистического марочного состава, сварка с предварительным подогревом до 350 °С и последующим длитель- ным перегревом выше 365 °С	Ограничение Si и P в стали ЭИ 415 (согл. табл. 1) и температуры сопутству- ющего подогрева (не выше 365 °С)
По зоне сплавления шва со сталью ЭИ 415	$\frac{23,6; 64,5; 37,5}{41,9}$	$\frac{70,2; 72,7; 105,4}{82,8}$
По высоте шва	$\frac{64,7; 61,8; 51,1}{59,2}$	$\frac{89,6; 136,1; 74,0}{99,9}$
* Испытания проводили на трех образцах.		

кости (≥ 59 Дж/см²) металла комбинированного сварного соединения роторных сталей при комнатной температуре. Все остальные характеристики механических свойств любого участка КСС ЭИ 415 + 25X2НМФА, полученного по измененной технологии, также соответствуют установленным требованиям.

Как один из результатов приобретенного опыта сварки комбинированных соединений роторных сталей, уместно отметить роль и обобщить реализованный выше подход, который, по-видимому, в ряде случаев может быть весьма продуктивным как при самостоятельном применении, так и в сочетании с другими технологическими мероприятиями. Это подход, в соответствии с которым поиск резервов для приближения контролируемой характеристики к требуемому значению проводится в допускаемых нормативными документами интервалах содержания легирующих элементов и примесей в сталях [6]. Этот путь может быть наиболее рациональным для совершенствования технологии получения комбинированных сварных соединений двух бейнитных сталей, например, когда интервалы оптимальных температур их отпуска не совпадают и проведением послесварочного отпуска обеспечить соответствие отдельных характеристик требуемым значениям не удастся, а степень несоответствия невелика. Реализация указанного подхода должна состоять в том, что послесварочный отпуск комбинированного соединения «сталь 1 + шов + сталь 2» проводится при температуре, гарантирующей надлежащие механические свойства всех участков сварного соединения стали 1. При этом на основе общих знаний о влиянии легирующих элементов и примесей на контролируемую характеристику устанавливается наиболее благоприятный химический состав стали 2 (но в пределах ее нормативного марочного состава) и проводится согласование более жестких требований к содержанию одного или нескольких элементов с изготовителем этой стали.

То же может касаться и наплавленного металла, и в этом случае проводится согласование особых требований к содержанию легирующих элементов с изготовителем сварочных материалов. Имеется положительный опыт такого согласования, в ходе которого предприятие-поставщик сварочной проволоки

марки Union S 3 NiMoCr выразило готовность обеспечить ее химический состав в рамках ISO 26304, но в требуемых более узких пределах.

Выводы

1. Сформулирован технологический подход, который может быть полезным при совершенствовании технологии получения комбинированных сварных соединений бейнитных сталей. При невозможности послесварочного отпуска комбинированного сварного соединения указанных сталей при температуре выше интервала охрупчивания одной из этих сталей уменьшить склонность к отпускному охрупчиванию и обеспечить соответствие ударной вязкости металла зоны сплавления этой стали требуемым значениям можно путем ограничения в этой стали содержания кремния и (или) марганца в рамках нормативного марочного состава стали, а также фосфора.

2. Предварительный подогрев металла комбинированных сварных соединений сталей ЭИ 415 и 25X2НМФА до температуры 350 °С и недопущение его перегрева при многопроходной сварке под флюсом выше 365 °С (сварка при температуре сопутствующего подогрева существенно ниже той, которая до сих пор считалась необходимой для стали ЭИ 415) оказывает благоприятное влияние на ударную вязкость участка перегрева на стали ЭИ 415.

3. Результаты исследований в рамках производственной аттестации технологии сварки под флюсом комбинированного соединения сталей ЭИ 415 и 25X2НМФА подтвердили пригодность аттестованной технологии для изготовления комбинированного ротора цилиндра среднего давления паровой турбины К-325-23,5 для тепловых электростанций.

Список литературы

1. Суботін В. Г., Левченко Є. В., Швецов В. Л. та ін. (2009) *Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт*. Харків, Фоліо.
2. Царюк А. К., Скульский В. Ю., Моравецкий С. И. и др. (2012) Создание сварно-кованого комбинированного ротора среднего давления паровой турбины мощностью 325 МВт. *Автоматическая сварка*, 8, 39–44.
3. Гольдштейн Я. Е. (1963) *Низколегированные стали в машиностроении*. Москва–Свердловск, МАШГИЗ.

4. Браун М. П. (1965) *Комплекснолегированные конструкционные стали*. Киев, Наукова думка.
5. Новиков И. И. (1978) *Теория термической обработки металлов*. Учебник. Изд. 3-е, испр. и доп. Москва, Металлургия.
6. Земзин В. Н., Шрон Р. З. (1978) *Термическая обработка и свойства сварных соединений*. Ленинград, Машиностроение.
7. Тимофеев М. М., Васильченко Г. С. (1962) Создание дисков из разнородных сталей для газовой турбины ЭГТУ 1000. *Вопросы сварки в энергомашиностроении*. Сборник ЦНИИТМАШ, книга 104. Яровинский Л. М. (ред.). Москва, МАШГИЗ, сс. 100–109.
8. Герман С. И. (1972) *Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса*. Москва, Машиностроение.
9. Шоршоров М. Х., Белов В. В. (1972) *Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке*. Атлас. Москва, Наука.

References

1. Subotin, V.G., Levchenko, E.V., Shvetsov, V.L. et al. (2009) *Development of steam turbines of new generation of 325 MW power*. Kharkiv, Folio [in Ukrainian].
2. Tsaryuk, A.K., Moravetsky, S.I., Skulsky, V.Yu. et al. (2012) Development of forge-welded combined medium-pressure rotor for 325 MW steam turbine. *The Paton Welding J.*, **8**, 36–41.
3. Goldshtejn, Ya.E. (1963) *Low-alloyed steels in machine-building*. Moscow-Sverdlovsk, MASHGIZ [in Russian].
4. Braun, M.P. (1965) *Complexly-alloyed structural steels*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Novikov, I.I. (1978) *Theory of heat treatment of metals: Manual*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Zemzin, V.N., Shron, R.Z. (1978) *Heat treatment and properties of welded joints*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
7. Timofeev, M.M., Vasilchenko, G.S. (1962) Development of discs from dissimilar steels for gas turbine EGTU 1000. *Problems of welding in power machine-building*. In: *Transact. of TsNIITMASH, Book 104*. Yarovsky, L.M. (ed), Moscow, MASHGIZ, 100–109 [in Russian].
8. German, S.I. (1972) *Electric arc welding of heat-resistant steels of pearlitic class*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Shorshorov, M.Kh., Belov, V.V. (1972) *Phase transformations and changes of properties in welding*. Atlas. Moscow, Nauka [in Russian].

C. I. Моравецкий¹, А. К. Царюк¹,
О. В. Вавилов², О. Г. Кантор²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²ПАТ «Турбоатом». 61037, м. Харків,

Московский просп., 199.
E-mail: office@turboatom.com.ua

ПІДВИЩЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ МЕТАЛУ КОМБІНОВАНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЛЕГОВАНИХ БЕЙНІТНИХ СТАЛЕЙ

Сформульовано можливий підхід в розробці технології виготовлення комбінованих зварних з'єднань бейнітних сталей застосований до відповідальних зварних вузлів, заснований на цілеспрямованому завданні оптимального складу легуючих елементів і домішок в основному та присадному металі у рамках їх марочного складу згідно з нормативними документами і сприяє підвищенню їх експлуатаційних характеристик. Порівняння результатів експериментальних досліджень, отриманих у рамках стандартної атестації технології зварювання, дозволяє припустити щодо ефективності реалізованого підходу. Бібліогр. 9, табл. 2.

Ключові слова: легована сталь, роторна сталь, комбіновані зварні з'єднання, зварювальні матеріали, хімічний склад, зварювання під флюсом, термічна обробка, відпускна крихкість, ударна в'язкість

S.I. Moravetsky¹, A.K. Tsaryuk¹, A.V. Vavilov², A.G. Kantor²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev-150, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²PJSC «Turboatom». 199, Moscow Ave., 61037, Kharkov, Ukraine. E-mail: office@turboatom.com.ua

IMPROVEMENT OF IMPACT TOUGHNESS OF METAL OF COMBINED WELDED JOINTS OF ALLOYED BAINITE STEELS

A possible approach in the development of technology of producing combined welded joints of bainite steels was formulated as applied to critical welded units, based on the purposeful presetting the optimum content of alloying elements and impurities in the base and filler metal within their grade composition according to the standard documents and contributing to improvement of their service characteristics. The comparison of results of experimental investigations obtained within the standard certification of welding technology, allows suggesting that the implemented approach is effective. 9 Ref., 2 Tab.

Keywords: alloyed steel, rotor steel, combined welded joints, welding consumables, chemical composition, submerged welding, heat treatment, tempering brittleness, impact toughness

Поступила в редакцию 22.09.2017

1-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРКЕ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ 2018 1st ICWNDT-2018

22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

Адрес: WGI: Trapezountos & Digeni Akrita, Elefsina 192 00, Attikis, Greece.

Phone (+30) 210 3630050, Fax (+30) 2103636917,

Website: www.wgi.gr, E-mail: tzaferis@wgi.gr

РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА (Обзор)*

**В. Д. ШЕЛЯГИН, А. Г. ЛУКАШЕНКО, В. Ю. ХАСКИН, А. В. БЕРНАЦКИЙ,
А. В. СИОРА, Д. А. ЛУКАШЕНКО, И. В. ШУБА**

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен обзор ряда разработок ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, выполненных за последние годы в области техники и технологии лазерной сварки. Данные разработки апробированы или внедрены в промышленном производстве на предприятиях Китайской Народной Республики в г. Чанчунь, г. Харбин и Украины в городах Киев, Черновцы, Днепр. Выделены сферы применения и факторы, сдерживающие тенденцию быстрого развития и внедрения технологии лазерной сварки на предприятиях Украины. Библиогр. 11, рис. 12.

Ключевые слова: лазерная сварка, разработка технологий, разработка аппаратуры и оснастки, лазерные технологические комплексы, сварные соединения, механические свойства

Глобальной тенденцией мирового прогресса в экономике наиболее развитых стран является широкое применение и совершенствование новых наукоемких перспективных технологий, например, таких как лазерные [1–5]. Использование лазерных технологий имеет решающее значение для повышения производительности труда и конкурентоспособности экономики. Отличительными особенностями применения лазеров в производстве являются высокое качество получаемых изделий, высокая производительность процессов, экономия людских и материальных ресурсов, экологическая чистота.

Лазеры, благодаря таким уникальным свойствам как высокая концентрация мощности излучения, когерентность, монохроматичность, нашли широкое применение в авиа-, ракето- и судостроении [5–9], автомобильной [8] и др. отраслях промышленности, науки, техники, связи, медицине, биологии и др. областях. Анализ объема мирового рынка реализованных источников лазерного излучения (без учета сопутствующих компонентов, технологической и др. оснастки) в 2013–2016 гг. и прогноз на 2017 г. представлены на рис. 1 [4]. Согласно данным авторитетного профильного издания «Laserfocusworld», за последние пять лет рынок лазерной техники неуклонно растет и его ежегодный объем уже превышает 10 млрд дол. США. При этом доля источников лазерного излучения, применяемых для обработки материалов, составляет около 30 % (рис. 2) [2]. В свою оче-

редь, основными технологическими операциями обработки материалов, для выполнения которых используется лазерное излучение, являются резка (35 %), сварка (25 %), микрообработка (20 %) и гравировка (15 %) [3].

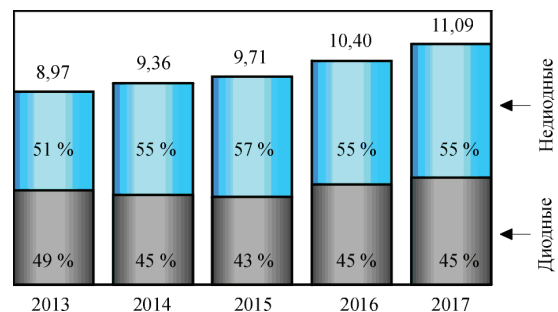


Рис. 1. Показатели продаж (в млрд дол. США) мирового рынка лазерных установок в 2013–2016 гг. (без учета манипуляторов и техоснастки) и прогноз на 2017 г. [4]

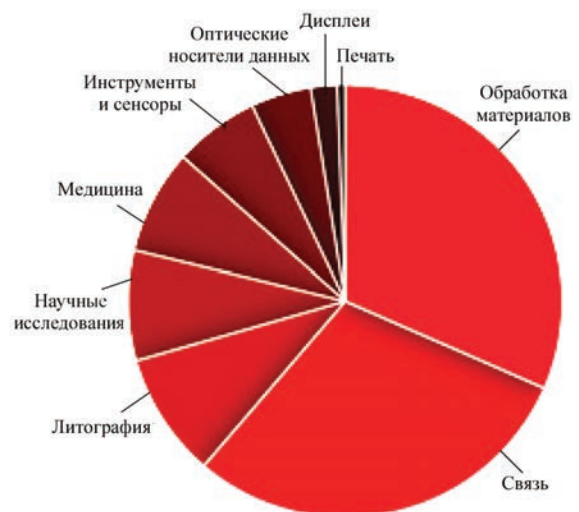


Рис. 2. Распределение применений в мире лазерных установок для различных отраслей промышленности [2]

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

Анализ международного рынка лазерных технологий [1] позволяет выявить основные тенденции его развития. Таковыми являются:

- высокая доля стоимости затрат на оборудование в общем объеме рынка лазерных технологий;
- сохранение бизнеса лазерных технологий в странах Западной Европы, США и др. странах с развитой экономикой, что отражает необходимость использования высококвалифицированного персонала;
- высокая стоимость лазерного технологического оборудования, приводящая к снижению спроса потребителей на технику с улучшенными техническими характеристиками;
- увеличение доли услуг из-за возрастающей сложности лазерных технологических систем, что требует больших усилий и затрат на их установку, развитие и обслуживание, а также наличия обслуживающего персонала высокой квалификации;
- преимущественное привлечение сторонних организаций для выполнения функций, связанных с применением лазерных технологий.

Все перечисленные выше тенденции характерны и для рынка лазерных технологий обработки материалов в Украине. Кроме того, следует отметить, что наиболее характерными дополнительными факторами, сдерживающими развитие рынка лазерных технологий в Украине, являются:

отсутствие отечественных производителей современных мощных лазерных установок для обработки материалов;

утрата технологий изготовления расходных компонентов (оптических; силовых; электронных и др. элементов), которые были разработаны и внедрены в промышленность более 30 лет назад, а также неспособность оставшихся отечественных производств переориентироваться на потребности стремительно развивающегося рынка компонентов для лазерных технологий;

отличие долевого распределения использования лазерных технологий обработки материалов (резки, сварки, термообработки, гравировки и др.) на предприятиях Украины от данных работы [1].



Рис. 3. Внешний вид заготовки многослойного сиффона после гидроформовки

В настоящее время, по нашим данным, для рынка лазерных технологий обработки материалов Украины характерно доминантное, по сравнению с другими технологиями, использование лазерной резки (оценочно около 65 % общего рынка обрабатывающих комплексов). Из остальных технологий лазерной обработки наиболее востребованными остаются лазерная маркировка (оценочно около 15 % общего рынка обрабатывающих комплексов) и стремительно развивающаяся в последние годы технология 3D-печати (оценочно около 10 % общего рынка обрабатывающих комплексов). Рынок технологических комплексов для процессов лазерной сварки, термообработки, прошивки отверстий и др. технологий, по нашим данным, не превышает 10 % общего рынка обрабатывающих лазерных комплексов. Изменение сложившейся ситуации с «перекосом» запросов отечественного рынка обрабатывающих лазерных комплексов в сторону резки и приведение его к уровню мировых стандартов, характерных для стран с развитой экономикой, возможно путем решения ряда задач, одной из которых является разработка конкурентоспособных на мировом рынке отечественных технологий и оборудования для лазерной сварки различных материалов.

Лазерная сварка металлических материалов применяется при создании конструкций авиационных и морских судов, деталей медицинской техники и узлов приборостроения, а также во многих др. отраслях промышленности. В Украине разработками в области лазерной сварки успешно занимаются научные коллективы ИЭС им. Е. О. Патона, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» и др. вузов, а также научных лабораторий ряда крупных промышленных предприятий.

В данной работе проведен обзор ряда разработок в области техники и технологии лазерной сварки, которые были выполнены в ИЭС в последние годы и были апробированы или внедрены в промышленность.

В ходе выполнения научных работ в ИЭС решалась задача установления закономерностей влияния технологических параметров лазерной сварки тонкостенных труб на геометрию и механические характеристики получаемых стыковых соединений холоднокатаной ленты толщиной $\delta = 0,15 \dots 0,2$ мм из высоколегированных коррозионностойких сталей 12X18H10T (ГОСТ 4986-79) и 1.4541 (DIN EN 10028-7:2000), с учетом требований последующего изготовления из них многослойных сиффонов [10]. По результатам сравнения геометрии, структуры и механических свойств полученных соединений установлено, что определяющим параметром, влияющим на качество данного сварного соединения, является погонная энергия,



Рис. 4. Внешний вид трехкоординатного комплекса «АРМА-100М» для лазерной сварки

оптимальный диапазон варьирования которой находится в пределах 3...5 Дж/мм. Результаты, полученные в ходе проведения работы, были положены в основу разработки промышленной технологии изготовления прямошовных тонкостенных сварных труб различного диаметра из нержавеющей стали, использующихся для производства многослойных сильфонов по ГОСТ 21744-83 (рис. 3). Такие сильфоны предназначены для работы в качестве компенсационных элементов, разделителей сред, уплотнительных устройств, а также элементов силового узла в средах, не вызывающих коррозии материала, при температуре от -260 до 550 °С.

Спроектированные трехкоординатные комплексы типа «АРМА-100М» (рис. 4) для лазерной сварки прямошовных тонкостенных труб из нержавеющей стали внедрены на ЧАО «КЦКБА» (г. Киев) и ООО «НИИЦ «Арматом» (г. Киев). Применение разработанных технологических рекомендаций и оригинальной технологической оснастки позволили обеспечить производительность одного такого комплекса до 5 тыс. шт. заготовок сильфонов в месяц. Готовая продукция уже используется в различной запорной арматуре, работающей в трубопроводах повышенного давления, при постоянной высокочастотной и низкочастотной вибрации, а также в запорных узлах, требующих точной установки положения запорного органа. Изготовленные с применением лазерной сварки многослойные сильфоны сертифицированы в соответствии с требованиями норм и правил, а также др. нормативных документов, устанавливающих требования безопасности в области атомной энергетики.

Продолжением представленной выше работы стала разработка технологии и оснастки для лазерной сварки сильфонных компенсаторов. Они соединяют детали и узлы, осуществляющие в

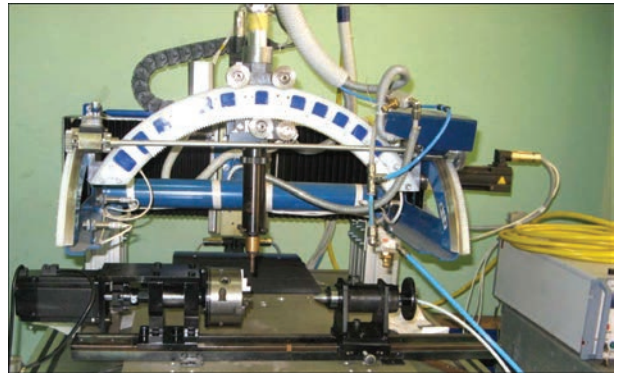


Рис. 5. Технологический комплекс для лазерной сварки сильфонных компенсаторов

процессе эксплуатации относительно перемещения или работающие в условиях вибрации. Основным рабочим элементом этих изделий является сильфон — гибкая гофрированная металлическая трубка из тонкостенной нержавеющей стали. Для получения сильфонных компенсаторов гофрированную трубку сваривают с массивной арматурой (фланцами, трубками, втулками и др.). Проведенные исследования показали, что для изготовления сильфонных компенсаторов из нержавеющей аустенитных сталей целесообразно применять сварку с импульсной модуляцией лазерного излучения. Разработаны оборудование (рис. 5) и технологические приемы лазерной сварки сильфонных компенсаторов, позволяющие получать в литом металле швов и в металле ЗТВ мелкозернистые структуры, имеющие повышенный уровень механических характеристик. Данная разработка внедрена на ПАО «Киевский завод «Аналитприбор» и ООО «НИИЦ «Арматом» для лазерной сварки корпусов датчиков (рис. 6).

Институт стратегических технологий им. академика С. Н. Конюхова (г. Днепр) на протяжении последних лет занимается проблемами разработки принципиально нового силового агрегата плазменного двигателя ПД140, который используется в составе маршевой или коррекционной двигательной установки ракетно-космической техники. Изготовление отдельных сборочных единиц



Рис. 6. Партия сильфонных компенсаторов, изготовленных с применением лазерной сварки

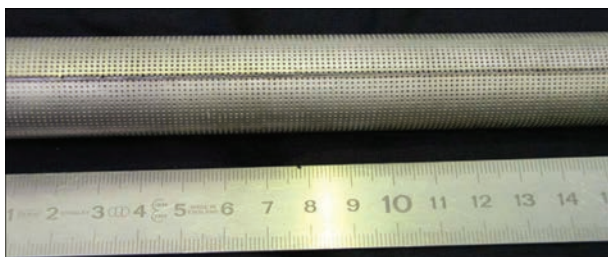


Рис. 7. Корпус тонкостенного трубчатого фильтрующего элемента, изготовленного по разработанной технологии лазерной сварки с порошковой присадкой

данного силового агрегата предполагает чрезвычайно жесткие требования по раскрою и качеству сварки его составных элементов. Совместно с ИЭС выполнены работы по апробации технологий лазерного раскроя и последующей лазерной сварки без механической обработки свариваемых кромок (250 шт.), деталей спирального нагревателя толщиной 0,25 мм (изготовленного из титанового сплава ВТ6). Результаты работ позволяют утверждать о значительном упрощении операции стыковки кромок деталей и улучшении качества сварных соединений. Исследованный уровень механических характеристик свидетельствует о высокой надежности сварных соединений и перспективности применения данных технологий в ракетно-космической отрасли.

При различных способах дуговой сварки плавлением часто используется технологический прием, заключающийся в заполнении расплавленным присадочным металлом пространства между свариваемыми кромками [11]. Аналогичный прием для лазерной сварки используется редко. Обычно стараются минимизировать зазор между соединя-

емыми кромками и не использовать присадочные материалы (для снижения энергозатрат). Нами предложен способ соединения кромок, которые невозможно плотно состыковать (например, при наличии перфорации). В его основу положена лазерная порошковая наплавка. Свариваемые кромки сводятся с небольшим (до одного диаметра отверстия перфорации) зазором и плотно прижимаются к медной технологической подкладке. В качестве вспомогательного оборудования используется питатель-дозатор для подачи присадочного порошка с грануляцией 60...100 мкм. Материал присадки подбирается в зависимости от металла свариваемых кромок. В процессе сварки зазор заполняется порошком, который плавится лазерным излучением. Такой прием позволяет на 10...30 % повысить коэффициент поглощения лазерного излучения по сравнению с обычной сваркой. В соответствии с разработанной технологией проводилась лазерная сварка корпусов трубчатых фильтрующих элементов с толщиной стенки $\delta = 0,5...0,6$ мм (сталь Х18Н10Т) (рис. 7). Опытно-промышленные партии корпусов трубчатых фильтрующих элементов, изготовленных в ИЭС по разработанной технологии лазерной сварки с порошковой присадкой, прошли успешные промышленные испытания и нашли свое применение при изготовлении элементов для фильтрации жидкостей на ОДО «Черновицкий химзавод» (г. Черновцы).

Для решения задач в области сварки вагоностроительного завода (г. Чанчунь, КНР), выполнена разработка инструмента для ручной лазерной сварки изделий (рис. 8), в частности, элементов внутрикорпусных конструкций вагонов современных скоростных железнодорожных поездов. Разработанный лазерный ручной инструмент входит в состав сварочной установки, которая управляется одним оператором-сварщиком. Массогабаритные характеристики разработанного ручного



Рис. 8. Внешний вид разработанного инструмента для ручной лазерной сварки



Рис. 9. Внешний вид сварных швов, выполненных по криволинейной траектории с помощью инструмента для ручной лазерной сварки



Рис. 10. Внешний вид разработанной рабочей головки для лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки

лазерного инструмента позволяют производить сварку в различных пространственных положениях. Функциональные возможности разработанного инструмента позволяют выполнять сварку с перемещением источника лазерного нагрева по любой заданной траектории (рис. 9) в пределах рабочего поля размером 50×30 мм. Проведенные металлографические исследования и механические испытания нахлесточных сварных соединений из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (толщина листа 2 мм), полученных с использованием разработанного ручного лазерного инструмента, показали, что уровень их механических характеристик не уступает характеристикам соединений, полученных с помощью автоматической лазерной сварки.



Рис. 11. Внешний вид фрагмента корпуса аккумулятора из сплава АМг6 ($\delta = 0,8$ мм), сваренного замкнутым швом с использованием излучения волоконного лазера



Рис. 12. Корпус датчика из стали 08Х18Н10Т, сваренный лазерным излучением

Для проведения научных исследований в области изучения физики процессов совместного воздействия лазерного излучения с длиной волны 1,07 мкм и импульсной дуговой плазмы на различные металлы, по заказу Харбинского института сварки Академии машиностроения и технологий Китая, выполнены разработка и изготовление оборудования (рис. 10). Создан комплекс устройств, предназначенных для выполнения технологических операций лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых (0,1...2,0 мм) металлов на постоянном, импульсном, переменном токе с возможностью отдельного регулирования амплитуды и длительности протекания тока, а также возможностью воздействия непрерывного или импульсного лазерного излучения.

Прошли промышленные испытания и апробацию на базе ряда украинских и зарубежных авиа- и ракетостроительных предприятий и другие научные разработки ИЭС по лазерной сварке. Среди них: сварка разнородных материалов (титановых сплавов с алюминиевыми; углеродистых с высоколегированными нержавеющей стали); сварка между собой различных марок коррозионностойких высоколегированных сталей и др.); сварка стрингерных панелей и др. элементов конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов [12]; стыковая сварка сложнопрофильных отражающих пластин из никелевых сплавов; сварка корпусных изделий из алюминиевых сплавов (рис. 11); изготовление различных датчиков из высоколегированных сталей (рис. 12) и жаропрочных сплавов.

Выводы

1. В настоящее время отличительными тенденциями, характерными для рынка лазерных технологий обработки материалов в Украине, по сравнению с международным рынком, являются: отсутствие отечественных производителей современных высокоточных мощных лазерных установок для обработки материалов; утрата технологий изготовления расходных компонентов; преваляро-

вание на отечественном рынке запросов на оборудования для резки.

2. Увеличение на отечественном рынке доли лазерной сварки возможно путем разработки отечественных технологий и создания оборудования для лазерной сварки различных материалов, конкурентоспособных ведущим мировым технологиям.

3. На сегодня технологии лазерной сварки наиболее востребованы в атомной, химической, приборо-, авиа- и ракетостроительной отраслях промышленности Украины.

4. Высокий уровень разработок ИЭС им. Е. О. Патона в области технологий и оборудования лазерной сварки подтверждается их востребованностью на мировом рынке.

Список литературы/References

1. Евстюнин Г. А. (2015) *Анализ российского и международного рынка лазерных технологий*. <http://docplayer.ru/29560271-Analiz-rossiyskogo-i-mezhdunarodnogo-rynka-lazernyh-tehnologiy-prezentaciya-k-kursu-lekciy-priglashyonogo-specialista.html>.
Evstyunin, G.A. *Analysis of Russian and international market of laser technologies*, <http://docplayer.ru/295602710Analiz-rossiyskogo-i-mezhdunarodnogo-rynka-lazernyh-tehnologiy-prezentaciya-k-kursu-lekciy-priglashyonogo-specialista.html>. [in Russian].
2. *Annual Laser Market Review & Forecast: Can Laser Markets Trump a Global Slowdown?* <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-52/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-can-laser-markets-trump-a-global-slowdown.html>.
3. *Лазеры на мировом и отечественном рынке*. http://online.mephi.ru/courses/new_technologies/laser/data/lecture/1/p25.html.
Lasers in world and national market, http://online.mephi.ru/courses/new_technologies/laser/data/lecture/1/p24.html [in Russian].
4. *Annual Laser Market Review & Forecast: Where Have All the Lasers Gone?* <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-53/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-where-have-all-the-lasers-gone.html>.
5. Nikolov M. (2014) Trends in Development of Weld Overlaying During the 21st Century. *Acta Technologica Agriculturae*, 17, 2, 35–38.
6. Yamaguchi T., Katoh M., Nishio K. (2009) Mechanical Properties of Aluminium Alloy Welds by Laser Beam. *Journal of Light Metal Weld. + Constr.*, 4, 13–22.
7. Cao X., Jahazi M., Immarigeon J. P., Wallace W. (2006) A Review of Laser Welding Techniques for Magnesium Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 2, 188–204.
8. Schubert E., Klassen M., Zerner I. et al. (2001) Light-Weight Structures Produced by Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry. *Ibid*, 115, 1, 2–8.
9. Chen H.-C., Pinkerton Andrew J., Li Lin (2011) Fibre Laser Welding of Dissimilar Alloys of Ti-6Al-4V and Inconel 718 for Aerospace Applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52, 9, 977–987.
10. Шелягин В. Д., Лукашенко А. Г., Лукашенко Д. А. и др. (2011) Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали. *Автоматическая сварка*, 4, 45–49.

Shelyagin, V.D., Lukashenko, A.G, Lukashenko, D.A. et al. (2011) Laser welding of thin-sheet stainless steel. *The Paton Welding J.*, 4, 38–42.

11. Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Шитова Л. Г. и др. (2005) Многопроходная сварка сталей больших толщин с использованием лазерного излучения. *Там же*, 10, 48–52.
Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu., Shitova, L.G. et al. (2005) Multi-pass welding of heavy steel sections using laser radiation. *Ibid.*, 10, 46–49.

В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, В. Ю. Хаскин,
А. В. Бернацкий, О. В. Сюра, Д. А. Лукашенко, И. В. Шуба

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

РОЗРОБКИ В ОБЛАСТІ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ, ВИКОНАНІ В ІЕЗ ім. Є. О. ПАТОНА (ОГЛЯД)

Проведено огляд ряду розробок ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, виконаних за останні роки в області техніки і технології лазерного зварювання. Дані розробки апробовані або впроваджені в промисловому виробництві на підприємствах Китайської Народної Республіки в м. Чанчунь, м. Харбін та України в містах Київ, Чернівці, Дніпро. Виділені сфери використання та фактори, що стримують тенденцію швидкого розвитку та впровадження технології лазерного зварювання на підприємствах України. Бібліогр. 11, рис. 12.

Ключові слова: лазерне зварювання, розробка технологій, розробка апаратури та оснащення, лазерні технологічні комплекси, зварні з'єднання, механічні властивості

V.D. Shelaygin, A.G. Lukashenko, V.Yu. Khaskin,
A.V. Bernatskii, A.V. Siora, D.A. Lukashenko, I.V. Shuba

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

DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF LASER WELDING EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES PERFORMED AT E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE (REVIEW)

The paper provides a review of a series of developments of E. O. Paton Electric Welding Institute performed in course of the latest years in the field of laser welding equipment and technologies. These developments were tested or implemented in commercial production at the enterprises of People's Republic of China in Changchun and Harbin and in Ukraine in Kiev, Chernovtsy and Dnipro. The spheres of application and factors limiting the tendency of fast development and implementation of laser welding technology at Ukrainian enterprises have been outlined. 11 Ref., 12 Fig.

Keywords: laser welding, technology development, development of apparatus and fixture, laser technological complexes, welded joints, mechanical properties

Поступила в редакцию 07.11.2017

КАЛЕНДАРЬ выставок и конференций в 2018 г.

Дата	Название мероприятия	Место проведения
23–26.01	Выставка аддитивных технологий и 3D-печати в промышленности «3D fab+print Russia»	г. Москва, Россия
31.01–02.02	XII Специализированная выставка «Металлообработка и сварка»	г. Красноярск, Россия
10–16.02	Международный семинар «Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте»	г. Брно, Чехия
01–03.03	Международная выставка «Fabex Middle East» с демонстрацией оборудования для обработки металлов давлением и сварки	г. Каир, Египет
15–18.03	Международная промышленная выставка «Win EURASIA/METAL WORKING» с разделом «Сварка в Евразии»	г. Стамбул, Турция
27–30.03	Выставка «Машекс Сибирь» с разделом «Сварочное оборудование и материалы»	г. Новосибирск, Россия
28–30.03	Выставка «UZMetalMachekspo-металлургия, металлообработка, станкостроение, сварка»	г. Ташкент, Узбекистан
03–05.04	«Киевская техническая ярмарка-2018»	г. Киев, Украина
10–12.04	9-я Выставка технологий защиты от коррозии и обработки поверхности	г. Кельце, Польша
10–13.04	Международная выставка «Сварка и резка»	г. Минск, Беларусь
16–20.04	Выставка «Wire and Tube-2018» (Проволока и трубы-2018)	г. Дюссельдорф, Германия
16–20.04	16-я Международная выставка трубопроводов, труб, проволоки, кабеля и метизов, технологий и оборудования для их производства	г. Дюссельдорф, Германия
18–21.04	XVI Международная конференция «Ti-2018 в СНГ»	г. Минск, Беларусь
24–27.04	Международная выставка «Сварка/Welding-2018»	г. С.-Петербург, Россия
25–27.04	VIII Специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент»	г. Львов, Украина
06–09.05	Международная выставка «IRAN OIL SHOW 2018» с разделами: Металлообработка. Сварка. Труба. Проволока	г. Тегеран, Иран
22–24.05	26-я Международная специализированная выставка «Машиностроение. Metallurgy - 2018»	г. Запорожье, Украина
01–03.06	XV Международный конгресс производителей ферросплавов	г. Йоханнесбург, ЮАР
05–06.06	Международная выставка лазерной обработки материалов	г. Штутгарт, Германия
11–13.06	Международная конференция «Титан-2018: производство, обработка, применение»	г. Киев, Украина
13–14.06	Международная конференция «Наплавка для защиты от износа компонент»	г. Галле, Германия
19–22.06	Международная выставка «AMM 2018 - ASTANA» с разделами: Metallurgy. Литье. Металлообработка. Сварка	г. Астана, Казахстан
29.05–01.06	Выставка «Металлоконструкции 2018» с конференцией «Стальные конструкции: оборудование, технологии, рынок»	г. Москва, Россия
15–20.07	81-я Ассамблея Международного Института Сварки	Бали, Индонезия
10–14.09	IX Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»	г. Одесса, Украина

Дата	Название мероприятия	Место проведения
12–13.09	Общероссийская конференция «Проволока – крепеж»	г. Абинск-Геленджик, Россия
17–19.09	IX Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров»	г. С.-Петербург, Россия
17–21.09	Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»	г. Одесса, Украина
16–18.10	60-я Международная сварочная конференция	г. Сосновец, Польша
16–18.10	Сварочная выставка «ExpoWELDING-2018»	г. Сосновец, Польша
16–19.10	Международная выставка «Weldex/Россварка–2018»	г. Москва, Россия
22–24.10	Международная конференция «Сварка и неразрушающий контроль»	г. Афины, Греция
13–16.11	Промышленная выставка «МеталлЭкспо 2018»	г. Москва, Россия
20–23.11	XVII Международный промышленный форум–2018 (выставки «Укрсварка», «Металлообработка» и др.)	г. Киев, Украина
30.11–01.12	Конференция «Сварка и термическая обработка мягких живых тканей»	г. Киев, Украина
05–06.12	Международная конференция «Сварка и родственные технологии – сегодня и будущее»	г. Киев, Украина

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

В. В. Кныш, С. А. Соловей. **Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями.** – Киев, КПИ им. Игоря Сикорского, 2017. – 315 с. Твердый переплет, 150×225 мм.

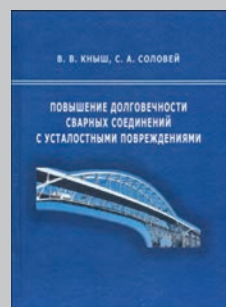
Монография посвящена проблеме продления срока службы элементов сварных металлоконструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, на разных стадиях их поврежденности: от накопления усталостных повреждений до развития магистральных трещин. Исследовано влияние высокочастотной механической проковки на повышение циклической долговечности сварных соединений как на стадии изготовления, так и после длительной эксплуатации. Предложены подходы к расчетному определению кинетики усталостных трещин в полях остаточных напряжений растяжения и сжатия. Рассмотрены конструктивные и технологические способы торможения усталостных трещин.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями в области усталости элементов сварных металлоконструкций длительной эксплуатации, расчетными методами определения и продления их ресурса. Может быть полезна студентам и аспирантам высших учебных заведений технических специальностей.

ЭЛЕКТРОД информ. Информационный бюллетень международной ассоциации «Электрод» (пилотный выпуск). – Киев, Ассоциация «Электрод», 2017 г. – 40 с. Мягкий переплет, 145×200 мм.

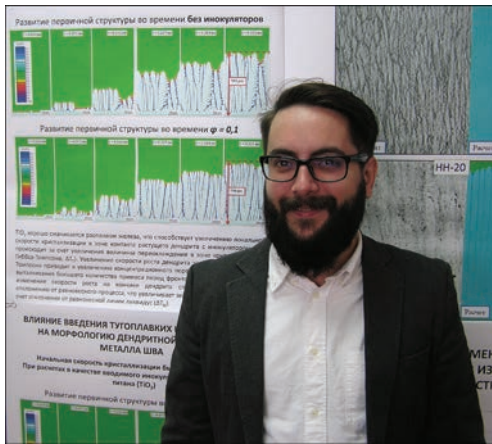
Бюллетень знакомит с деятельностью Ассоциации в 2017 г. В бюллетене также размещена информация об Опытном заводе сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона, Белорецком металлургическом комбинате. Публикуется статья «Современные направления сварки порошковой проволокой низколегированных сталей повышенной прочности».

С полной версией выпуска можно ознакомиться на сайте Ассоциации: <http://association-electrode.com>



ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины



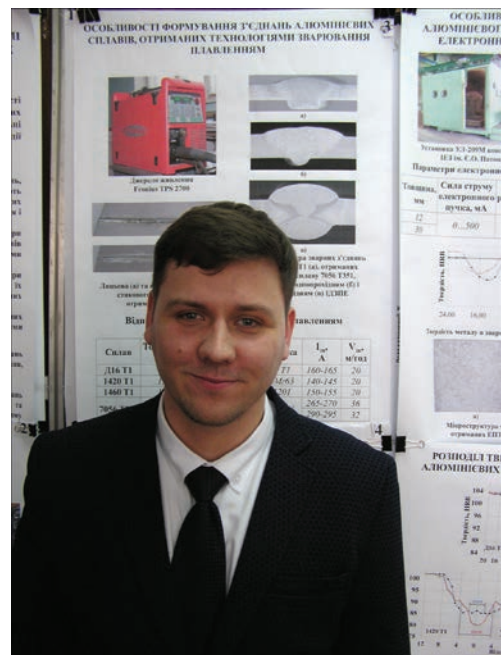
Д. Е. Ермоленко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) 13 декабря 2017 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Модифицирование дендритной структуры металла сварных швов низколегированных высокопрочных сталей дисперсными индукторами». Научный руководитель диссертанта д-р техн. наук, стар. науч. сотр. В. В. Головки (заведующий отделом, ИЭС им. Е. О. Патона). В качестве официальных оппонентов выступили: д-р техн. наук, проф. С. К. Фомичев (НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского») и д-р техн. наук, старш. науч. сотр. Н. П. Гадзира (зав. лабораторией, Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины).

Диссертационное исследование направлено на изучение влияния инокулирования тугоплавких неметаллических включений (инокулянтов) в сварочную ванну на кинетику образования дендритной структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей, а также на последующие твердофазные преобразования в металле шва и их влияние на конечные механические свойства металла шва. Исследования проведены на основе разработанной математической модели и авторского программного обеспечения, которое способно моделировать в реальном времени процесс кристаллизации сварочной ванны с учетом влияния дисперсных тугоплавких индукторов при сварке ВПНЛ сталей.

Результаты исследований показали, что с помощью введения тугоплавких индукторов в сварочную ванну возможно управлять параметрами первичной структуры, и, как следствие, конечной микроструктурой металла шва и его механиче-

скими свойствами. Для исследования был выбран ряд дисперсных тугоплавких соединений (TiC , TiN , SiC , TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO) с различной поверхностной активностью при взаимодействии с расплавом железа. Численные расчеты и экспериментальные исследования показали, что с уменьшением угла смачивания расплавом металла сварочной ванны частиц дисперсного тугоплавкого индуктора, размер столбчатых дендритов увеличивается, что, в свою очередь, приводит к увеличению в конечной микроструктуре металла шва доли структурных составляющих, которые приводят к повышению ударной вязкости металла шва при незначительном уменьшении его прочности.

Предложен технологический регламент формирования металла шва с введением дисперсных тугоплавких индукторов и проведена опытно-промышленная проверка на ПАТ «НКМЗ» (Новокраматорск).



С. И. Мотрунич (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) 13 декабря 2017 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Влияние способов сварки и нерегулярности нагружения на сопротивление усталости соединений термически упрочненных алюминиевых сплавов». Научный руководитель диссертанта д-р техн. наук, проф. В. В. Кныш (заведующий отделом, ИЭС им. Е. О. Патона). В качестве официальных оппонентов выступили: д-р техн. наук В. В. Квасницкий (НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорско-



го») и д-р техн. наук, стар. науч. сотр. В. А. Лео́нец (вед. науч. сотр., Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренка НАН Украины).

Диссертация посвящена установлению влияния различных способов сварки, таких как аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (АДСНЭ), сварка трением с перемешиванием (СТП), импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (ИДСПЭ), электронно-лучевая сварка (ЭЛС) и нерегулярности нагружения на сопротивление усталости соединений термически-упрочненных алюминиевых сплавов различных систем легирования.

Установлено влияние основных факторов, определяющих сопротивление разрушению при циклическом нагружении сварных соединений алюминиевых сплавов Д16Т1, 1420Т1, 1460Т1 и 7056-Т351. Установлен характер распределения остаточных напряжений, уровень разупрочнения и структурные особенности соединений при сварке исследуемых сплавов с использованием технологий АДСНЭ, ИДСПЭ, СТП и ЭЛС.

Предложен инженерный метод определения коэффициентов концентрации напряжений в зонах геометрической неоднородности стыковых сварных соединений при растяжении и изгибе, основанный на гипотезе ломаных сечений, на соединения с двусторонним симметричным и односторонним усилением. Показано, что в соединениях с односторонним усилением шва максимальные напряжения в зависимости от отношения высоты усиления к тол-

щине соединения могут действовать как у подножия выступа, так и на корневой стороне шва, что подтверждается локализацией усталостного разрушения в многоциклового области.

Предложен алгоритм и разработано программное обеспечение для построения кривых усталости сварных соединений при воздействии узкополосного процесса случайного нагружения и их сопоставление с соответствующими кривыми усталости соединений, полученных при регулярном нагружении. На основе предложенного алгоритма показано, что спектр узкополосного нагружения с приближенным к экспоненциальному закону распределения величины амплитуды уменьшает циклическую долговечность соединений сплава 1460Т1, полученных технологиями АДСНЭ и СТП в 2,0...2,5 раза по сравнению с регулярным нагружением. Узкополосный процесс нагружения с распределением величины амплитуды, близким к нормальному, соединений сплавов 1420Т1 и Д16Т1, полученных технологиями СТП и АДСНЭ, уменьшает долговечность в 1,5...2,0 раза по сравнению с регулярным нагружением.

От имени членов Ученого совета, сотрудников Института электросварки, а также редакции журнала «Автоматическая сварка» поздравляем соискателей с успешной защитой и желаем им больших творческих успехов в дальнейшей деятельности.

Календарь декабря*

1 декабря 1884

В



Алонсо Полинг и Генри Харнишфегер основывают фирму «P&H Mining Equipment Inc.». В 1933 г. компания создала первый в мире цельносварной экскаватор. Несмотря на слабый спрос на рынке, руководство фирмы постоянно вводило инновации и совершенствовало производство. Были заменены заклепки на цельносварную конструкцию. Методы сварки также были улучшены собственными патентами. Создавая краны и экскаваторы, которые были прочнее, легче и дешевле, фирма «P&H Mining Equipment Inc.» уверенно заняла свое место на рынке.

2 декабря 2008



Открыт памятник В. Г. Шухову (1853–1939) — инженеру, архитектору. Им изобретены гиперboloидные конструкции, сетчатые перекрытия оболочек и промышленные установки термического крекинга нефти. Является автором проектов и техническим руководителем строительства первых российских нефтепроводов (1878) и нефтеперерабатывающего завода с первыми российскими установками крекинга нефти (1931). Внес выдающийся вклад в технологии нефтяной промышленности и трубопроводного транспорта, в разработку и постройку сварных каркасов зданий мартеновских и конверторных цехов, газопроводов горячего дутья и воздушонагревателя домны.

3 декабря 1959

На ледоколе «Ленин» был поднят государственный флаг, ознаменовав начало новой вехи в гражданском судостроении СССР. Создание качественно нового типа корабля потребовало освоения принципиально новых технологий. Уже в процессе строительства атомохода были впервые разработаны и внедрены новые способы сварки нержавеющей стали. Работники ОТК, проверявшие качество сварных швов, тщательно следили за сварными работами. Наиболее ответственные швы проходили до 11 проверок. На рентгеноскопии сварных швов ушло 4 км рентгеновской пленки. Протечка сварных швов допускалась не более 4-5 капель в год. Ледокол проработал около 30 лет в тяжелых арктических условиях.



4 декабря 1945

Опубликован патент на метод приварки шпилек. Способ был разработан Тедом Нельсоном еще в 1936 г., но даже много лет спустя остается самым эффективным и надежным для сварки крепежных приспособлений. Процесс приварки шпилек по технологии Нельсона включает те же самые основные металлургические принципы, как любой другой вид технологии электродуговой сварки — используется дуговой разряд, для того чтобы оплавить конец болта (шпильки) или электрода с частью основной конструкции металлической заготовки. Сегодня компания, созданная Нельсоном, продолжает носить его имя и является крупным поставщиком оборудования для приварки шпилек.



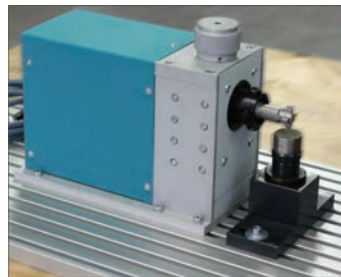
* Материал подготовлен компанией ООО «СТИЛ ВОРК» (г. Кривой Рог) при участии редакции журнала. Календарь публикуется ежемесячно, начиная с выпуска журнала «Автоматическая сварка» № 11, 2017 г.

5 декабря 2014

Успешно стартовал космический корабль «Орион», пришедший на смену космическим челнокам «Space Shuttle». Примечательным для этого корабля является применение сварки трением с перемешиванием. Инженеры «Marshall Space Flight Center» НАСА разработали инновационный инструмент для сварки трением с перемешиванием. Кроме космонавтики новая технология используется в производстве корпусов кораблей, потолков вагонов, крыльев и фюзеляжей самолетов.

**6 декабря 1963**

Был подан патент на ультразвуковой метод сварки термопластов на имя Роберта Солофа и Сеймура Линсли. Появление и первоначальное развитие изобретения ультразвуковой сварки относят к 1930–1940-м гг. Во время исследований ультразвуковых колебаний было обнаружено, что при одновременном воздействии на зону сварки определенного усилия сжатия и ультразвуковых колебаний соединение образцов осуществляется без пропускания через них электрического тока.

**7 декабря 1995**

Спускаемый зонд «Галилео» вошёл в атмосферу Юпитера. Этот автоматический космический аппарат НАСА был создан для исследования Юпитера и его спутников. В ходе полета на борту возникла проблема из-за приварившихся друг к другу в вакууме деталей его антенны. Это событие получило широкую огласку и в 2006 г. Европейское космическое агентство выпустило документ, в котором рассматривало вероятность холодной сварки в вакууме как определенную опасность для космических аппаратов. Чтобы не допустить чего-то подобного, конструкторам приходится снижать количество движущихся деталей, изготавливать их из разных материалов или покрывать их поверхности защитным слоем.

**9 декабря 1937**

Скончался Нильс Густав Дален (1869–1937) — шведский изобретатель, основатель компании AGA, нобелевский лауреат по физике в 1912 г. Потеряв во время экспериментов зрение ученый все же получил премию «за изобретение автоматических регуляторов, используемых в сочетании с газовыми аккумуляторами для источников света на маяках и буйях». Компания AGA (до слияния в 2000 г. с компанией Linde) крупнейший производитель промышленных газов.

10 декабря 1964

Нобелевская премия по физике была вручена Ч. Таунсону (50%, США), Н.Г. Басову (25%, СССР) и А.М. Прохорову (25%, СССР) за открытие нового принципа генерации и усиления света — лазера. На основе этих работ в начале 1960-х годов в США был создан первый оптический квантовый генератор — лазер на рубине, используемый и в сварке. Лазер получил свое название по первым буквам английской фразы — «Light-Amplification by Stimulated Emission of Radiation» («Усиление света путем стимулированного излучения»).



11 декабря 1954

Спущен на воду «Форрестол» — американский авианосец, головной корабль своего типа. Это был первый авианосец, спроектированный в послевоенное время, в котором был полностью учтён опыт, полученный во время Второй мировой войны, а также учтены требования реактивной авиации. При строительстве каждого авианосца типа «Форрестол» было израсходовано около 700 т сварочных материалов, что явилось рекордом использования таких материалов в судостроении.



12 декабря 1961

Запатентован новый способ сварки труб. Установка была создана на основе конкретного запроса для строительства электростанций, технические характеристики которых требовали обеспечения безупречных повторяющихся швов, чтобы гарантировать максимальный уровень безопасности. Для освоения нового метода в промышленном производстве была создана французская сварочная компания «Polysoude». Сегодня компания «Polysoude» разрабатывает, производит и продает оборудование и установки для орбитальной и механизированной сварки и наплавки.



13 декабря 1816

Родился известный немецкий инженер, изобретатель, ученый Вернер Сименс (1816–1892). Совместно с Иоганном Гальске (1814–1890) он создает фирму «TelegraphenBauanstalt Siemens & Halske», занимавшуюся широким кругом работ в области точной механики и оптики, а также созданием электро-медицинских аппаратов. В качестве основной сферы деятельности компания выбрала электротелеграфию. Именно телеграф со своим огромным количеством проводов, нуждающихся в соединении, стал катализатором развития контактной сварки. Так, концы телеграфных проводов со специально выполненным косым срезом торцов собирали внапуск и соединяли путем «накала» проходящим постоянным током.



14 декабря 1922

Открытие подземной линии метро в Глазго, Шотландия. Линия является третьей старейшей подземной системой в мире после метро в Лондоне и Будапеште. Это единственное метро на Британских островах за пределами Лондона, которое расположено полностью под землей. Во время строительства метро использовали электродуговую сварку.



15 декабря 1932

Начали эксплуатировать ВЛ19 — советский магистральный грузопассажирский электровоз постоянного тока, выпускавшийся с 1932 по 1938 гг. Являлся первым цельносварным электровозом, а среди серийных (до марта 1953 г.) единственным электровозом, конструкция которого была создана в СССР. В 1931 г. почти на всех паровозостроительных и вагоностроительных заводах Советского Союза перешли на сварку деталей, узлов и конструкций.



16 декабря 1947

Физик-экспериментатор Уолтер Браттейн, работавший с теоретиком Джоном Бардином, собрал первый работоспособный точечный транзистор. Позже благодаря созданию Уильямом Шокли теории р-п-перехода (1948–1950) был получен плоскостной транзистор, затем планарный (1959), ставший основой создания монолитных интегральных схем, применяемых в том числе в сварочных инверторах.

**17 декабря 1946**

Запатентована гравитационная сварка. Этот вид сварки распространен незначительно, например, в судостроении при сварке полотнищ, но в некоторых случаях является удобным и необходимым. При сварке труднодоступных мест применяется сварка лежащим электродом. Ее преимущество заключается в том, что благодаря несложной механизации процесс становится легко управляемым, один рабочий обслуживает сразу несколько установок. Сильное световое излучение дуги при зажигании электродов неблагоприятно воздействует на сварщика и работающих рядом. Автоматизация как процесса зажигания дуги (от пульта управления), так и всего процесса гравитационной сварки позволяет вывести сварщика из зоны светового излучения и вредных пылевых выделений.

**18 декабря 1959**

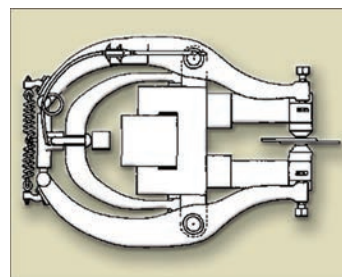
Была заложена первая в мире атомная подводная лодка К-162 с титановым корпусом. Советская атомная подводная лодка второго поколения являлась самой быстрой в мире подводной лодкой, достигавшей в подводном положении скорости свыше 80 км/ч (42 узла). Сварку титановых конструкций приходилось проводить в среде аргона (было израсходовано около 1 млн м³ аргона). Эти работы требовали ювелирной точности и хирургической чистоты в процессе выполнения работ.

**19 декабря 1939**

Принят на вооружение Красной Армии, а в марте 1940 г. утвержден к серийному производству средний танк Т-34. Всего за годы войны выпущено более 35 тыс. Т-34 всех модификаций. Первоначально корпус и башня Т-34 сваривались вручную электродами со специальной обмазкой. Всего выполнялось несколько десятков швов. Одновременно с разработкой технологии были спроектированы и изготовлены две установки для автоматической сварки борта корпуса танка Т-34 с подкрылком. В январе 1942 г. был сварен первый опытный образец. Технология и оборудование прошли успешную апробацию. По инициативе Е.О. Патона была запущена первая в мире поточная линия по производству бронекорпусов танков, на которой было задействовано около 20 установок для автоматической сварки под флюсом. Производительность автоматической сварки оказалась в 10 раз выше, чем ручной (фото танка Т-34 на территории ИЭС им. Е. О. Патона).

**20 декабря 1898**

Опубликован патент О. Кляйншмидта на одну из разработок точечной сварки. Кляйншмидт заменил угольные электроды в «приборах» Бенардоса медными электродами. Также Кляйншмидт придумал усовершенствованное устройство для сварки, вмонтировав трансформатор непосредственно в клещи. С этого времени точечная сварка вышла из стадии лабораторных экспериментов и началась работа над повышением производительности процесса.



21 декабря 1928

Президент США Джон Калвин Кулидж (1872–1933) подписал билль, одобряющий осуществление проекта строительства гравитационной плотины на реке Колорадо. Первое электричество было выработано генераторами станции уже через восемь лет. Плотина Гувера — уникальное гидротехническое сооружение в США, представляющее собой бетонное арочно-гравитационное сооружение высотой 221 м и гидроэлектростанцию, расположенные в нижнем течении реки Колорадо. Вода к турбинам поступает с высоты 100 м через стальные цилиндрические колодцы, собранные из сварных сегментов.



22 декабря 2007

Французская ракета-носитель «Ariane 5» вывела на орбиту первый в истории африканский спутник. Для создания «Ariane 5» инженеры, курирующие сварку топливного бака для ракеты, изготовили его из алюминия толщиной 3 мм. Сварочный аппарат вращался внутри бака, что позволяло обеспечивать процесс бесшовной сварки. Целостность шва имеет решающее значение, так как криогенные резервуары образуют несущую конструкцию первой ступени ракеты-носителя. Кроме этого, для создания ракеты использовались сварочные роботы «КУКА», которые также обеспечивали бесшовную сварку.



24 декабря 1818



Родился Джеймс Джоуль (1818–1889) — английский физик, внесший значительный вклад в становление термодинамики. В 1853–1854 гг. совместно с английским физиком У. Томсоном он открыл явление охлаждения газа при его медленном протекании через пористую перегородку. Во время исследований электричества сплавлялись пучки проводов в коробке с углем, благодаря пропусканию по проводам электрического тока, т. е. в принципе осуществлялась сварка сопротивлением.

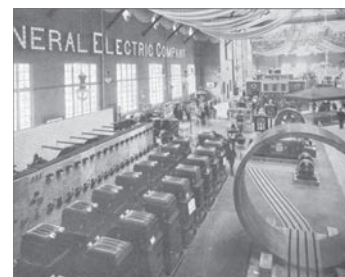
25 декабря 1901

В рождественскую ночь 1901 г. было совершено нападение на земельный банк в Ганновере. Попытка ограбления не удалась, и о ней не стоило бы и вспоминать, если бы не одно обстоятельство: здесь впервые для вскрытия сейфа преступники воспользовались «газовым резаком» — автогенной горелкой. Неизвестные грабители, которых можно назвать «технически неграмотными», потерпели фиаско. Дело в том, что для горения железа необходимо большое количество кислорода, они же смогли преодолеть лишь наружную восьмимиллиметровую обшивку сейфа, изготовленного из простой листовой стали.



26 декабря 1922

Роберт Нобель из компании «General Electric» разработал автоматическую сварку с помощью постоянного тока, используя напряжение дуги, которым регулировалась скорость подачи. В основном этот метод использовался для ремонта изношенных валов двигателей и колес кранов. Этот процесс использовал голую электродную проволоку, скорость подачи которой зависела от напряжения дуги.



27 декабря 1968

Завершил полет «Аполлон-8» — второй пилотируемый космический корабль в рамках американской космической программы «Аполлон», в ходе которого люди впервые достигли другого небесного тела, Луны. Это был первый пилотируемый старт ракеты «Сатурн-5». Ракета «Сатурн-5» остается самой грузоподъемной, наиболее мощной, самой тяжелой и самой большой из созданных на данный момент ракет, выведших полезную нагрузку на орбиту. Для сварки алюминиевых баков ракеты использовалась электронно-лучевая, лазерная и плазменно-дуговая сварка.



28 декабря 1927

Опубликован один из патентов Д. А. Дульчевского (1879–1961) — советского изобретателя в области электросварки. Ученый-изобретатель создал автомат оригинальной конструкции, по принципу действия являющийся переходным от автоматов прерывистого действия к автоматам непрерывного действия. Этот автомат нашел практическое применение на железнодорожном транспорте, главным образом для выполнения наплавочных работ. С 1940 г. этот способ стал активно внедряться в промышленность и строительство.



29 декабря 1920

Плавающая мастерская для сборки «ESAB IV» была принята в регистр Ллойда. На корабле стояли два сварочных поста с генератором постоянного тока. Фирма «ESAB» смогла выполнять ремонтно-сварочные работы «на плаву». Во многих случаях подобная техника ремонтных работ оказалась незаменимой. Корабль «ESAB IV» функционировал около 60 лет.



30 декабря 1957

Джеймс Байрон патентует аппарат для ультразвуковой сварки. В сварочной технике ультразвук может быть использован в различных целях. Воздействуя им на сварочную ванну в процессе кристаллизации, можно улучшить механические свойства сварного соединения благодаря измельчению структуры металла шва и лучшему удалению газов. Ультразвук может быть источником энергии для создания точечных и шовных соединений. Сварка металлов ультразвуком находит все более широкое применение, так как этот способ имеет ряд преимуществ и особенностей по сравнению с контактной и холодной сваркой. Особенно перспективна ультразвуковая сварка применительно к изделиям микроэлектроники.



31 декабря 1886



Николай Николаевич Бенардос (1842–1905) получил патент на точечную контактную сварку. Неизвестно, когда и при каких обстоятельствах пришел Н. Н. Бенардос к принципу точечной контактной сварки. Первый в мире патент на этот способ (и «прибор» для его реализации) был выдан на его имя в Германии. В качестве электродов в нем служили графитовые бруски, вставляемые в клещи, которые сжимали вручную.



Программы профессиональной подготовки на 2018 г.

Шифр курса	Наименование программы		Продолжительность	Сроки проведения		
1. Повышение квалификации инженерно-технических работников (с аттестацией на право технического руководства сварочными работами при изготовлении сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)						
101	Координация сварочных работ согласно ДСТУ ISO 14731		подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)	февраль, апрель, июнь, октябрь	
102			переаттестация	18 ч	по мере комплектования групп	
103	Расширение области аттестации координаторов (руководителей) сварочных работ		6 ч	апрель, ноябрь		
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)		подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп	
107			переаттестация	22 ч		
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.		72 ч	март		
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)		3 недели (112 ч)	январь, декабрь		
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС		8 ч	январь, май, октябрь		
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп		
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)			
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)			
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке		6 ч	ноябрь		
117	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:		32 ч	январь, октябрь		
118			20 ч	январь - март, май, июль, сентябрь - декабрь		
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке	32 ч	январь, октябрь, декабрь		
120			20 ч	февраль, март, май, июнь, сентябрь, октябрь		
121		специалистов по техническому контролю	16 ч	февраль, май, июль, октябрь		
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	36 ч			
123		специалистов по охране труда	16 ч			
130	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки (МИС) с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	453 / 126 ч ¹	апрель, октябрь		
132		Международный технолог по сварке	372 / 91 ч ¹			
134		Международный специалист по сварке	248 / 60 ч ¹			
135		Международный практик по сварке	114 ч			
136		Международный дизайнер (конструктор) по сварке	40 ч	по согласованию с МИС		
137		Международный инспектор по сварке	полного уровня	230 ч	июль или сентябрь (по мере комплектования групп)	
140				стандартного уровня		170 ч
139				базового уровня		115 ч
149	специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер / технолог по сварке»			76 / 78 ч		
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений		специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	февраль	
142			переаттестация	22 ч	июль	
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений		специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп	
144			переаттестация	20 ч		
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов		специальная подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)		
146			переаттестация	22 ч		
151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком		
152	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей					
153	Технологические процессы и обеспечение качества в авиастроении					
Тематические семинары (возможно проведение на территории заказчика)						
161	Нормативно-техническая документация в сварочном производстве, состояние и перспективы		2 дня (16 ч)	март, июнь		
162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов		2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь		
163	Изготовление конструкций из стали согласно требований ДСТУ EN 1090		32 ч	февраль		

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

203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	186 ч	по согласованию с заказчиком
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка» с присвоением квалификации «Международный специалист по сварке»	100 ч	

3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий
(с присвоением квалификации в соответствии с национальной и международной квалификационными системами)

Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:				
301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами (с присвоением национальной и международной квалификации)	9 недель (356 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG) (с присвоением национальной и международной квалификации)	5 недель (192 ч)		
303	газовой сварки (с присвоением национальной и международной квалификации)	3 недели (116 ч)		
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) (с присвоением национальной и международной квалификации)	7 недели (276 ч)		
306	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	3 недели (112 ч)		
307	электродуговой сварки	3 недели (112 ч)		
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных трубопроводов)	3 недели (112 ч)		
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб) с аттестацией в соответствии с ДСТУ EN 13067	5 недель (196 ч)		
Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:				
310	Международный сварщик угловых швов (IFW) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	130 – 210 ч ²	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
312	Международный сварщик плоских соединений (IPW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	250 – 380 ч ²		
315	Международный сварщик труб (ITW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	360 - 510 ч ²		
318	Международный практик-сварщик (IWP) с аттестацией по EN ISO 9606-1	35 - 153 ч ²		
Переподготовка СВАРЩИКОВ с присвоением квалификации «Международный сварщик»: (IFW, IPW, ITW)				
321	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 112 ч ²	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
322	переподготовка сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	76 - 118 ч ²		
323	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 78 ч ²		
Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:				
330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
331	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)		
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)		
333	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)		
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком	
335	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	2 недели (72 ч)		
336	электродуговой сварки	2 недели (72 ч)		
Курсовая подготовка контролеров неразрушающего контроля:				
343	Специализация - визуально оптический контроль	72/196 ч ³	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком	
344	Специализация – радиографический контроль	72/196 ч ³		
345	Специализация – ультразвуковой контроль	72/196 ч ³		
346	Специализация – магнитопорошковый контроль	72/196 ч ³		
347	Специализация – капиллярный контроль	72/196 ч ³		
Целевая подготовка и подтверждение квалификации:				
362	Персонала, занимающегося нанесением защитных покрытий	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)	
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)	
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)	
366	специалистов по поверхностной закалке колесных пар на установке высокотемпературной закалки УВПЗ - 2М»		72 ч	по согласованию с заказчиком
367	сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах выполняющих наплавку острияков, крестовин стрелочных переходов железнодорожных путей с аттестацией согласно СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		5 недель (194 часа)	

4. Аттестация персонала сварочного производства

400	Аттестация координаторов (руководителей) сварочных работ в соответствии с ДСТУ ISO 14731		8 ч	проводится по окончании курсов 101-109
401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами НПАОП 0.00-1.16-96 и стандартами ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732		72 ч	постоянно
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96		24 ч	
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5		32 ч	
405	Специальная подготовка и аттестация сварщиков авиационной промышленности в соответствии с ДСТУ ISO 24394		72 ч	
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1		24 ч	
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии с стандартом ДСТУ ISO 14732		2 недели (72 ч)	
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч	
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки рельсов в соответствии с ДСТУ ISO 14732 и СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		2 недели (72 ч)	проводится по окончании курса 308
414	Аттестация сварщиков пластмасс в соответствии с ДСТУ EN 13067 (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)			проводится по окончании курса 309
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб) в соответствии с ДСТУ EN 13067		32 ч	ежеквартально
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно ДСТУ EN 9712	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I ур) ч ⁴	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II ур) ч ⁴	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I ур) ч ⁴	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II ур) ч ⁴	
433		визуально-оптический контроль	16 / 20 / 30 (I ур) ч ⁴	
436			20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II ур) ч ⁴	
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732 и СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		32 ч	февраль

5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	4 – 12 ч ⁵	по согласованию с заказчиком
502	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	4 – 12 ч ⁵	
503	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA)	4 – 16 ч ⁵	
512	Практические тренинги по различным способам сварки	8 – 32 ч ⁵	

¹ - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки и опыта работы в сварочном производстве.

² - Продолжительность обучения зависит от специализации.

³ - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

⁴ - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

⁵ - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

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

Украина, 03150, г. Киев, ул. Антоновича, 56 Тел. (044) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09,
Факс (044) 456-48-94; E-mail: paton_muac@ukr.net, <http://muac.kpi.ua>

Подписка на журнал «Автоматическая сварка»
www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as
Подписной индекс 70031

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств: Каталог видань України, «Прессцентр», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



Подписка на журнал «The Paton Welding Journal»
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj
Подписной индекс 21971

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
2000 грн.	4000 грн.	5400 руб.	10800 руб.	174 дол. США	348 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов
на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.
В 2018 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2017 гг. в формате *.pdf.

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

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

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

Стоимость рекламы

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

Подписано к печати 05.12.2017. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,14. Усл.-отт. 9,99. Уч.-изд. л. 10,44 + 1 цв. вклейка.
Печать ООО «ДИА».
03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.