

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

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

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

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

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

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

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

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

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

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

Интервью с директором ПАО «Харьковский машиностроительный завод «Свет Шахтера» А. Н. Ковальчуком 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Квасницкий В. В., Квасницкий В. Ф., Dong Chunlin, Мамвиенко М. В., Ермолаев Г. В. Напряженное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке 7
Аношин В. А., Илюшенко В. М., Лукьянченко Е. П. Влияние основных примесей на образование трещин при сварке медно-никелевых сплавов и наплавке монель-металла на сталь 14
Кавуниченко А. В., Швеиц В. И., Антипин Е. В. Особенности контактной стыковой сварки железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями 18
Вакуленко І. О., Плітченко С. О. Визначення параметрів режиму зварювання тертям з перемішуванням сплаву на основі алюмінію 24

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Чепрасов Д. П., Кузнецов Ю. А., Ледников Е. А. Автоматическая сварка под флюсом пролетных строений мостов из высококачественных сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА в монтажных условиях 31
Махлин Н. М., Водолазский В. Е., Попов В. Е., Коротынский А. Е., Лавров С. И. Выбор технологии сварки при изготовлении и восстановительном ремонте спиралей подогревателей высокого давления энергоблоков АЭС 37
Ворончук А. П., Жудра А. П., Петров А. В., Федосенко В. В. Влияние режимов наплавки порошковыми лентами на химический состав и твердость наплавленного металла 44
Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Жданов В. А. Использование нетоковедущих расходоуемых заготовок при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе 49

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Календарь выставок и конференций в 2018 г. 53

ХРОНИКА

Конкурс работ Малой академии наук Украины в области сварочного производства 54
Посещение ИЭС специалистами Ланьжоуского технологического университета (КНР) 55

Информация

Методика оценки состояния металла сварного корпуса реактора ВВЭР-1000 56
Сварка циркония и его сплавов 59
Разработано в ИЭС 62
Календарь апреля 63

Автоматичне Зварювання

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Головний редактор **Б. Є. Патон**

ЗМІСТ

Інтерв'ю з директором ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло Шахтаря»

О. М. Ковальчуком 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Квасницький В. В., Квасницький В. Ф., Dong Chunlin, Matvienko M. V., Ermolaev G. V. Напружений стан зварних та паяних вузлів з однорідних матеріалів з м'яким прошарком при осьовому навантаженні 7

Аношин В. А., Ілюшенко В. М., Лук'яненко Є. П. Вплив основних домішок на утворення тріщин при зварюванні мідно-нікелевих сплавів і наплавленні монель-металу на сталь 14

Кавуніченко А. В., Швець В. І., Антипін Є. В. Особливості контактного стикового зварювання залізничних хрестовин з рейковими закінченнями 18

Вакуленко І. О., Плітченко С. О. Визначення параметрів режиму зварювання тертям з перемішуванням сплаву на основі алюмінію 24

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Чепрасов Д. П., Кузнецов Ю. А., Ледніков Є. О. Автоматичне зварювання під флюсом прогінних будов мостів з високоякісних сталей 10ХСНДА і 15ХСНДА в монтажних умовах 31

Махлін Н. М., Водолазський В. Є., Попов В. Є., Коротинський О. Є., Лавров С. І. Вибір технології зварювання при виготовленні і відновному ремонті спіралей підігрівачів високого тиску енергоблоків АЕС 37

Ворончук О. П., Жудра О. П., Петров О. В., Федосенко В. В. Вплив режимів наплавлення порошковими стрічками на хімічний склад і твердість наплавленого металу 44

Кусков Ю. М., Соловйов В. Г., Осечков П. П., Жданов В. О. Використання неструмоведучих витрачаючих заготовок при електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі 49

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

Календар виставок і конференцій у 2018 р. 53

ХРОНІКА

Конкурс робіт Малої академії наук України в області зварювального виробництва 54

Відвідування ІЕЗ спеціалістами Ланьжоуського технологічного університету (КНР) 55

ІНФОРМАЦІЯ

Методика оцінки стану металу зварного корпусу реактора ВВЕР-1000 56

Зварювання цирконію та його сплавів 59

Розроблено в ІЕЗ 62

Календар квітня 63

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

Адреса редакції

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

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

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

CONTENTS

Interview with A.N. Kovalchuk, Director of PJSC «Kharkov Machine-Building Plant «Svet

Shakhtyora» 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Kvasnitskii V. V., Kvasnitskii V. F., Dong Chunlin, Matvienko M. V., Ermolaev G. V. Stressed state of welded and brazed components from similar materials with a soft interlayer under axial loading 7

Anoshin V. A., Ilyushenko V. M., Lukyanchenko E. P. Effect of basic additives on formation of cracks in welding of copper-nickel alloys and surfacing of monel on steel 14

Kavunichenko A. V., Shvets V. I., Antipin E. V. Features of flash-butt welding of rail frogs with rail ends 18

Vakulenko I. O., Plitchenko S. O. Determination of parameters of friction stir welding mode of aluminum-based alloy 24

INDUSTRIAL

Cherpasov D. P., Kuznetsov Yu. A., Lednikov E. A. Automatic submerged arc welding of bridge spans of high-quality steels 10KhSNDА and 15KhSNDА in field 31

Makhlin N. M., Vodolazsky V. E., Popov A. E., Korotynsky A. E., Lavrov S. I. Selection of welding technology in manufacture and restoration repair of spirals of high-pressure heaters of power units of NPP 37

Voronchuk A. P., Zhudra A. P., Petrov A. V., Fedosenko V. V. Influence of surfacing modes using powder strips on chemical composition and hardness of deposited metal 44

Kuskov Yu. M., Soloviov V. G., Osechkov P. P., Zhdanov V. A. Application of non-conducting consumable billets at electroslag surfacing in current-supplying mould 49

BRIEF INFORMATION

Calendar of exhibitions and conferences in 2018 53

NEWS

Competition of works of Minor Academy of Sciences of Ukraine in the field of welding 54

Visit to PWI of specialists of Lanzhou Technological University (China) 55

INFORMATIONS

Methods of evaluation of welded casing metal state of WWER-1000 reactor 56

Welding of zirconium and its alloys 59

Developed in the PWI 62

Calendar of April 63

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

Address

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

ИНТЕРВЬЮ С ДИРЕКТОРОМ ПАО «ХАРЬКОВСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД «СВЕТ ШАХТЕРА» А. Н. КОВАЛЬЧУКОМ

ПАО «Свет Шахтера» производит оборудование для горной промышленности: скребковые конвейеры и перегружатели; шахтные дробилки; предохранительные гидравлические муфты; головные взрывобезопасные аккумуляторные светильники; анализаторы метана.

Продукция эксплуатируется в различных горнотехнических и климатических условиях на угольных, сланцевых, калиевых шахтах.

Продукция сертифицирована согласно требованиям ДСТУ ISO 90010–2001.



Александр Николаевич, ваше предприятие в последние три года успешно развивается. Оно наращивает выпуск шахтного оборудования, значительную долю которого составляют сварные конструкции. В условиях, когда рынок независимой Украины сократился, чем можно объяснить интенсивное развитие вашего предприятия?

Да, действительно, внутренний рынок горно-шахтного оборудования в Украине ограничен и доля продаж на внутреннем рынке снизилась. Более остро встал вопрос выхода на внешние рынки, в связи с чем все большее значение приобретает индивидуальный подход к каждому заказу, быстрота его выполнения и постоянные связи с потребителями.

Несмотря на все трудности, мы увеличили номенклатуру выпускаемой нашим предприятием продукции. Освоили производство очистных и проходческих комбайнов, нишенарезных комплексов. Начали производство ранее несвойственной для нас продукции — взрывозащищенных трансформаторных подстанций. Работаем в области пер-

спективной развивающейся струговой выемки, что позволит еще больше расширить занимаемую нами нишу в производстве горно-шахтного оборудования.

За 2017 г. заводом было изготовлено 17 конвейеров различного типа, 15 очистных и проходческих комбайнов, 50 трансформаторных подстанций, большой объем запасных частей к горно-шахтному оборудованию, экспорт составил 18 % выпуска продукции.

Качество, надежность и безопасность нашей продукции подтверждаются соответствующими сертификатами, что делает ее конкурентоспособной при поставках как на внутренний, так и на внешний рынки.

Под Вашим руководством проведена реконструкция производственных мощностей. Что сделано для обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции?

Одной из крупных инвестиций в оборудование завода «Свет Шахтера» 2014–2017 гг. стало приобретение проволочного электроэрозионного станка «Mitsubishi MV2400S+» и обрабатывающего центра DOOSAN DBC160 (Южная Корея) с системой управления Fanuk 31i-B (Япония). Стоимость внедрения этих проектов составила 4,5 и 25 млн грн, соответственно.

С приобретением и вводом в эксплуатацию современного высокопроизводительного оборудования предприятие смогло освоить новую технологию обработки сложных поверхностей, повысить качество выпускаемых изделий, снизить зависимость предприятия от аутсорсинга, а также создать новые рабочие места для операторов станков с ЧПУ.

Для работы на современном оборудовании приобретается высокопроизводительный инструмент проверенных мировых производителей — Walter (Германия), Sandvik (Швеция), Taegu Tec и Korloy (Южная Корея) и так далее.

Кроме станков для электроэрозионной обработки, какое еще используется современное оборудование для сварки?

На предприятии «Свет Шахтера» используется оборудование для автоматической наплавки крановых колес под слоем флюса. Планируется замена полуавтоматической сварки на автоматическую и роботизированную при изготовлении отдельных конструкций шахтного оборудования.

Достижения вашего предприятия связаны с проводимой кадровой политикой. Известно, что к вам с удовольствием идет молодежь. Какие условия работы на вашем предприятии? Какая кадровая политика?

Наша философия предельно проста — работать сегодня так, чтобы обеспечить себе будущее. И это нам во многом удается. Нас знают, мы даем возможность всем желающим получить достойную, высокооплачиваемую, стабильную работу в г. Харькове.



Мы своевременно выплачиваем заработную плату и не имеем задолженности. В 2017 г. у нас на 40 % повысились сдельные тарифы для основных производственных рабочих-сдельщиков с целью создания конкурентоспособного уровня заработной платы на рынке труда, также для дополнительной мотивации произошел рост заработной платы и по другим категориям персонала. В целом в 2017 г. средняя заработная плата повысилась на 35 % от уровня 2016 г. и составила 9000 грн.

Как решаются вопросы обучения и развития персонала?



На предприятии можно пройти профессиональную подготовку и переподготовку, а также получить вторую профессию без отрыва от производства и стать квалифицированным профессионалом. За счет внутренних ресурсов предприятия прошли обучение 2309 сотрудников, получили смежную профессию 87 работников, новым профессиям обучились 108 человек. Общая стоимость инвестиций в обучение и профессиональную подготовку работников предприятия за 2017 г. составила 469,544 тыс. грн.

У нас действует система наставничества, позволяющая адаптироваться на рабочем месте вновь принятым сотрудникам. Особое внимание уделяется молодым специалистам. Обязательно проводятся курсы целевого назначения, которые дают возможность работникам развиваться и повышать свой профессиональный уровень. Каждый сотрудник имеет возможность реализовать свой потенциал и построить перспективную карьеру.

Какое внимание на предприятии уделяется социальной сфере?

Работники нашего предприятия обеспечены полным соцпакетом. У нас организована бесплатная доставка автобусами сотрудников до работы от метро, функционирует столовая и буфет, где рабочие могут полноценно пообедать.

Администрация предприятия оказывает подшефную и благотворительную помощь школе и детским дошкольным учреждениям. Ежегодно поздравляем первоклассников своих работ-

ников с Днем знаний, дарим портфели и канцтовары как старт к новой жизненной ступени.

Администрация и профком завода заботятся об отдыхе работников завода и членов их семей. Сотрудники имеют возможность отдыхать в пансионатах, оздоровительных базах, а дети в детских оздоровительных лагерях.

Любители футбола, волейбола, дартса и других видов спорта принимают участие в спартакиадах, которые организует предприятие.

Корпоративная культура на нашем предприятии поддерживается проведением различных мероприятий, приуроченных к праздникам: День машиностроителя, Яблочный Спас, День знаний, Новый год и т. д.

На предприятии «Свет Шахтера» создана молодежная организация, которая ведет активную спортивно-культурную жизнь на предприятии, в ряды которой все желающие могут всегда вступить. Помимо выполнения основных гарантий, компенсаций и льгот, закрепленных Законодательством и Коллективным договором, на предприятии действует компенсационная политика жилья, согласно которой работники получают компенсационные выплаты за аренду жилья.

Таким образом, мы успешно закрепились на рынке, при этом сохранили лучшие традиции и сформировали новые методы работы. Мы смело демонстрируем умение соответствовать вызовам времени, принимать и реализовывать амбициозные стратегические задачи.

Александр Николаевич, ваше предприятие расширило географию поставок оборудования. В какие страны вы поставляете изготовляемое вами оборудование? Каким Вы видите предприятие при сравнении с аналогичными предприятиями стран ЕС, Китая, США?

Наше предприятие кроме внутреннего рынка Украины поставляет горно-шахтное оборудование для угольных шахт Казахстана, России и Польши, калийных шахт Беларуси и сланцевых шахт Эстонии.

Ведутся работы по выходу на рынки Болгарии, Турции, Румынии, Боснии.

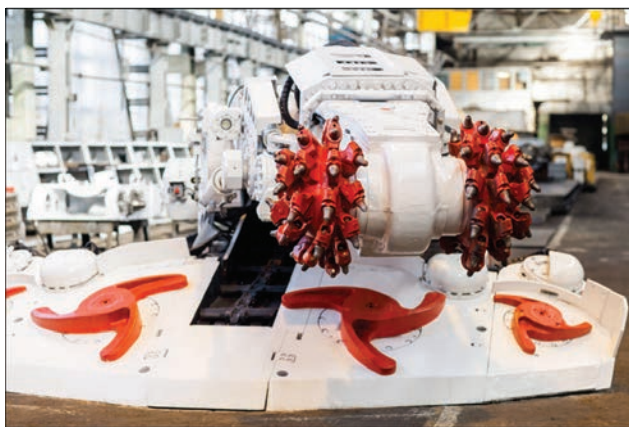
На рынке горно-шахтного оборудования сейчас высокая конкуренция. Чтобы быть конкурентоспособным предприятием на уровне производителей из ЕС, США и Китая необходимо проводить колоссальную работу.

Это связано не только с высоким техническим уровнем поставляемого оборудования, которое должно соответствовать требованиям Европейских директив по безопасности, гармонизированных стандартов ЕС, Китая и США, но и с логистикой доставки, организацией сервисного обслуживания оборудования в процессе эксплуатации. Эти высокие требования необходимо переносить и на внутренний рынок для его удержания в условиях жесткой конкуренции с зарубежными производителями.

Известно, что выпуск конкурентоспособной продукции требует научного обеспечения. Планируете ли Вы сотрудничество с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, НТУ «ХПИ» и другими организациями?

Производство конкурентоспособного горно-шахтного оборудования требует применения современных износостойких термически упрочненных материалов как отечественных, так и зарубежных производителей. Соответственно, для успешного их применения необходимо использование современных технологий, обеспечивающих качественные сварные соединения. В большинстве случаев такую информацию можно узнать из научных статей специализированных изданий, таких как «Автоматическая сварка» и «Сварщик». Когда нужной информации





не находится, обращаемся за консультацией непосредственно к специалистам Института электросварки им. Е. О. Патона.

Наше предприятие активно взаимодействует с различными учебными заведениями города. Мы открыты для прохождения производственной и технологической практик на базе ПАО «Свет Шахтера». За 2017 г. у нас прошли практику 282 учащихся, за которыми были закреплены сотрудники из числа высококвалифицированных работников.

Сотрудничает наше предприятие и с Национальным техническим университетом «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»). Студенты кафедры сварки проходят на нашем предприятии преддипломную практику, изучают материалы и оборудование для производства металлоконструкций, т. е. знакомятся со сварочным производством «вживую».

В чем состоит конкурентоспособность выпускаемого вашим предприятием оборудования?

Многолетний опыт работы предприятия лег в основу создания высококвалифицированно-го коллектива менеджеров и технических специалистов, решающих любые задачи по проектированию, изготовлению, внедрению и сервисному сопровождению горно-шахтного оборудования.

Основными составляющими конкурентоспособности горно-шахтного оборудования, выпускаемого машиностроительным заводом «Свет Шахтера», являются минимальные сроки изготовления, качество продукции на уровне европейской конкурентной цены, выполнение гарантийных обязательств, сервисное сопровождение изготавливаемой продукции, а также наличие консигнационных складов, что позволяет в сжатые сроки осуществить поставку оборудования заказчику и его техническое обслуживание.

Ваше предприятие может служить примером эффективного развития производства. Назовите главные принципы организации производства предприятия в современных условиях.

Современный рынок диктует свои условия и сейчас, чтобы эффективно развиваться, необходимо иметь гибкое производство, которое в кратчайшие сроки позволяет осваивать новые виды продукции.

На предприятии идет внедрение электронного документооборота и «сквозного» проектирования, которое позволяет ускорить процессы разработки и согласования конструкторской и технологической документации, а также выпуска готовой продукции.

Особое внимание на предприятии уделяется повышению квалификации сотрудников, поддержке и развитию рационализаторской и изобретательской деятельности. Поддерживается материальная заинтересованность коллектива в своевременном выпуске качественной продукции.

Также одним из главных принципов является инвестирование в современное высокопроизводительное и энергоэффективное оборудование, а также применение в производстве современных материалов и инструмента, что позволяет изготавливать продукцию в срок, который необходим заказчику.

Интервью записал В. В. Дмитрик

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ ОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ ОСЕВОЙ НАГРУЗКЕ

В. В. КВАСНИЦКИЙ^{1,3}, В. Ф. КВАСНИЦКИЙ², DONG CHUNLIN³, М. В. МАТВИЕНКО², Г. В. ЕРМОЛАЕВ²

¹НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова.

54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

³China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding, Guangzhou, P. R. China. E-mail: dchunlin@163.com

Методом компьютерного моделирования исследовано напряженное состояние в узлах, полученных диффузионной сваркой и пайкой, под действием осевой нагрузки. Рассмотрены цилиндрические узлы из стали с прослойкой меди с нагружением выше предела текучести меди. Показано, что в результате формирования сложного напряженного состояния уровень эквивалентных напряжений в прослойке снижается по сравнению с приложенной осевой нагрузкой и повышается в небольшой зоне основного металла вблизи внешней поверхности у стыка с прослойкой, что вызывает эффект упрочнения (разгрузки) прослойки и разупрочнения (перегрузки) основного металла. Получены количественные зависимости степени упрочнения прослойки и разупрочнения основного металла от величины внешней нагрузки. Установлено, что в упругопластической стадии нагружения узла разупрочнение основного металла более выражено, чем в упругой. Степень упрочнения прослойки в упругой стадии ее работы не зависит от величины внешней нагрузки, а в упругопластической стадии растет пропорционально нагрузке. Библиогр. 9, рис. 5.

Ключевые слова: сварные и паяные узлы, мягкая прослойка, компьютерное моделирование, напряженное состояние, силовое нагружение

В современной технике все более широко применяются новые композиционные материалы и узлы, которые нельзя соединить сваркой плавлением. В этих случаях используют пайку или сварку в твердом состоянии, например диффузионную сварку в вакууме (ДСВ). При ДСВ часто используют промежуточные прослойки для образования гарантированного контакта соединяемых поверхностей по всей площади. В качестве прослоек используют медь, алюминий, никель. При пайке промежуточной прослойкой является паяный шов.

Напряженное состояние и работа соединений с мягкой прослойкой исследовались в работах [1–3], но аналитические методы имеют ограниченные возможности, не позволяют учесть все особенности материалов, видов нагружения и конструктивных факторов, в том числе и кинетику формирования напряженного состояния (НС).

Современная компьютерная техника и разработанные программные комплексы дают широкие возможности для таких исследований. В данной работе для моделирования НС использовали программный комплекс ANSYS, основанный на методе конечных элементов, который применялся нами и в предыдущих работах [4–7].

В работе [6] установлено, что в узлах с мягкой прослойкой при нагружении осевой нагрузкой НС в зоне соединения становится объемным, эк-

вивалентные напряжения в материале прослойки уменьшаются, а в более прочном основном материале наоборот — увеличиваются, т. е. проявляется так называемый эффект упрочнения мягкой прослойки [1–3], связанный с НС соединения. При этом моделировался только один вариант, когда приложенная нагрузка (40 МПа) близка к пределу текучести (38 МПа) материала прослойки.

Целью настоящей работы было исследование НС сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при одноосном нагружении сжатием, при котором осевые напряжения от приложенной нагрузки заметно превышают предел текучести материала прослойки как в процессе формирования соединения, так и при работе на растяжение.

Мягкой называют прослойку, предел текучести которой меньше, чем у основного металла ($\sigma_{\text{тп}} < \sigma_{\text{тм}}$).

Исследовалось НДС цилиндрических узлов при соединении однородного материала (сталь + сталь) через мягкую прослойку меди толщиной 50 мкм (относительная толщина $s/d = 0,0025$).

Вследствие симметрии образца относительно середины толщины прослойки моделировалось НС верхней половины образца с соответствующим закреплением узлов на нижней кромке модели.

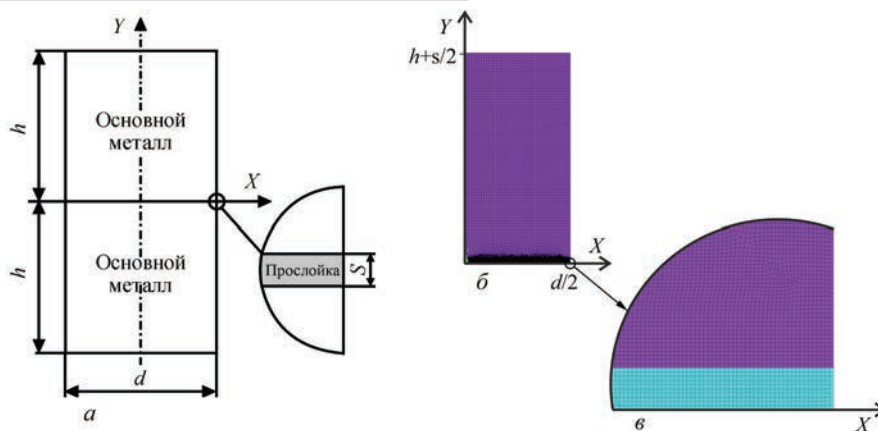


Рис. 1. Общий вид образца с прослойкой (а), сечение осесимметричной конечно-элементной модели (б) и зона сопряжения прослойки с соединяемым металлом (в)

Размеры модели: цилиндр диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 20$ мм, половина толщины прослойки $s/2 = 25$ мкм. Схема разбивки на конечные элементы (КЭ) модели в целом и области, прилегающей к прослойке, приведена на рис. 1.

Свойства соединяемых материалов и прослойки: сталь с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, пределом текучести 250 МПа, коэффициентом Пуассона 0,3, модуль упрочнения при пластическом деформировании $2 \cdot 10^3$ МПа; медь с модулем упругости $E = 1 \cdot 10^5$ МПа, пределом текучести 100 МПа, коэффициентом Пуассона 0,34, модуль упрочнения при пластическом деформировании $1 \cdot 10^3$ МПа.

Модель нагружалась осевой нагрузкой сжатия, от которой значение напряжения изменялось от 100 до 200 МПа, т. е. максимальные напряжения превышали предел текучести прослойки до двух раз, так, чтобы процесс деформирования материала прослойки происходил как в упругой, так и пластической стадиях. При смене сжатия (в процессе формирования соединения) на растяжение (в процессе эксплуатации) знаки напряжений и деформаций поменяются на обратные без изменения их значений и характера распределения.

Для оценки влияния НС на механические свойства материалов в зоне соединения использовался коэффициент жесткости напряженного состояния, равный отношению приложенных к узлу напряжений σ_y к эквивалентным $\sigma_{\text{экв}}$ в данном материале: $K_{\text{ж}} = \sigma_y / \sigma_{\text{экв}}$ [8]. Величина этого коэффициента определяет эффект разупрочнения (эквивалентные напряжения превышают приложенную нагрузку, $K_{\text{ж}} < 1$) или упрочнения (эквивалентные напряжения меньше приложенных, $K_{\text{ж}} > 1$) материала в той или иной зоне узла по сравнению с линейным напряженным состоянием, в условиях которого проводятся стандартные механические испытания материалов на прочность. При $K_{\text{ж}} < 1$ снижается прочность, т. е. способность сопротивляться пластическому деформированию

материала и повышается его пластичность, т. е. способность пластически деформироваться без разрушения. При $K_{\text{ж}} > 1$ напротив, прочность повышается, а пластичность снижается.

Анализ полей всех составляющих и эквивалентных напряжений в узлах при нагружении осевой нагрузкой показал, что в результате отличающихся механических свойств соединяемых материалов и прослойки в небольшой зоне соединения, а именно, в материале прослойки и прилегающих участках основного металла, шириной около двух толщин прослойки, помимо осевых напряжений появляются все другие составляющие: радиальные, окружные нормальные и касательные напряжения, т. е. НС становится объемным. В результате чего в этой зоне узла эквивалентные напряжения отличаются от приложенных осевых σ_y , превышая их в основном металле, и снижаясь в материале прослойки. При этом при увеличении нагрузки характер полей практически не изменяется, растет только уровень напряжений пропорционально увеличению нагрузки.

Анализ эпюр эквивалентных напряжений (рис. 2), определяющих поведение материала при нагружении (чисто упругое или упругопластическое деформирование), показал, что как в соединяемых материалах, так и в прослойке, на большей части ее длины (до 80...90 %) сохраняется практически постоянный их уровень.

При этом в основном металле эквивалентные напряжения равны приложенной нагрузке (рис. 2, а, в), а в прослойке они изменяются от 71 до 100 МПа (упругое нагружение) при изменении нагрузки от 100 до 130 МПа и остаются практически неизменными на уровне предела текучести (около 100 МПа) при нагрузке от 140 до 200 МПа (упругопластическое нагружение) (рис. 2, б, г).

В непосредственной близости от кромки стыка они несколько возрастают как в основном металле, так и в материале прослойки в упругой стадии ее работы. Ширина зоны повышенных напряжений не

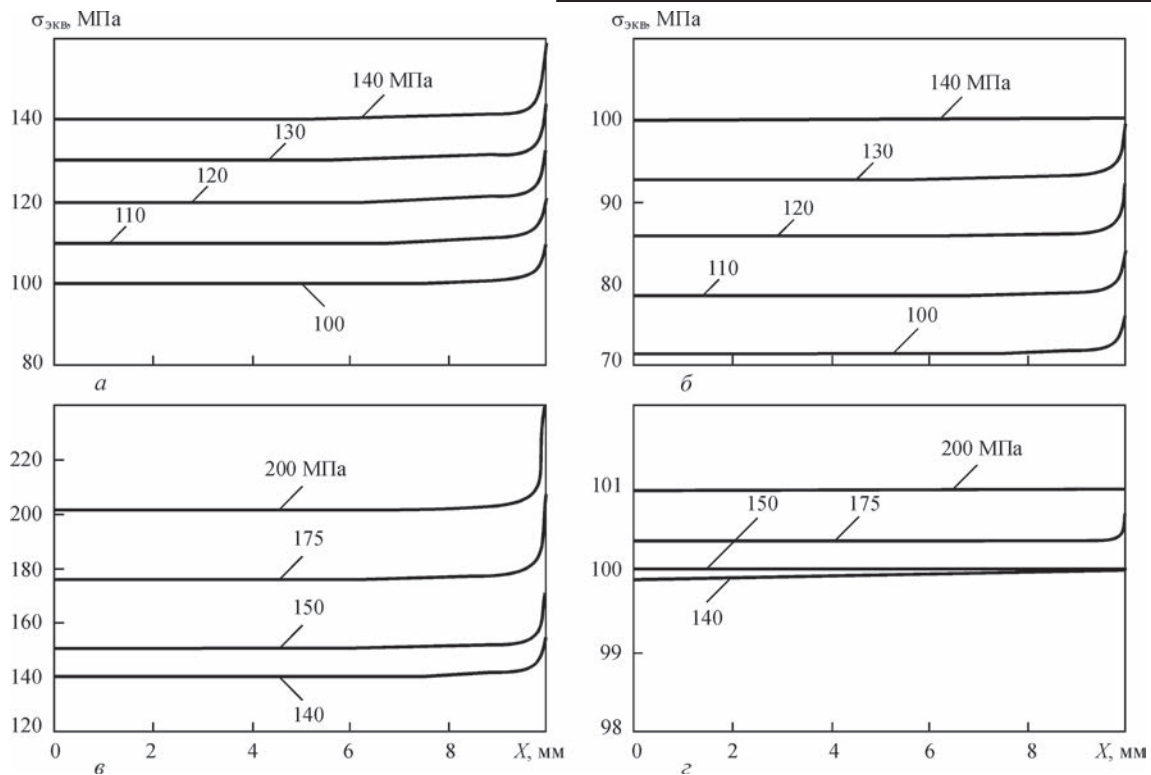


Рис. 2. Эпюры эквивалентных напряжений по стыку в стали (а, в) и прослойке (б, г) при разных осевых нагрузках

превышает 1...2 мм (10...20 % радиуса образца). Это приводит к изменению коэффициента жесткости $K_{ж}$ напряженного состояния на этом участке и несколько изменяет эффект разупрочнения или упрочнения по сравнению с линейным напряженным состоянием.

Для анализа и сравнения с более прочными прослойками, имеющими больший предел текучести, использовали понятие «коэффициент перегрузки прослойки», равный отношению напряжений от приложенной осевой нагрузки к пределу текучести прослойки $K_{пер} = \sigma_{нагр} / \sigma_{т.пр}$. В нашем случае при упругом нагружении прослойки он изменялся в пределах от 1,0 (нагружение 100 МПа) до 1,3 (130 МПа), а при упругопластическом от 1,4 (140 МПа) до 2,0 (200 МПа).

С увеличением нагрузки от 100 до 130 МПа (степень перегрузки прослойки от 1,0 до 1,3) максимальные эквивалентные напряжения в основном металле вблизи кромки стыка увеличиваются от 108 до 141 МПа (рис. 2, а) по линейному закону. Соответственно, коэффициент разупрочнения (жесткости напряженного состояния) основного металла вблизи кромки стыка при этом остается практически неизменным на уровне около 0,92.

При дальнейшем увеличении нагрузки от 140 до 200 МПа, когда в прослойке появляются пластические деформации, максимальные напряжения, как и при упругом нагружении, увеличиваются от 155 до 241 МПа (рис. 2, в) также практически по линейному закону, который описывается уравнением $\sigma_{экв} = 141K_{пер} - 41$, несколько отличающимся от

упругой стадии $\sigma_{экв} = 110K_{пер} - 2$. Соответственно, происходит уменьшение коэффициента жесткости напряженного состояния в основном металле у кромки стыка от 0,90 при нагрузке 140 МПа, вызывающей появление пластических деформаций в прослойке, до 0,83 при давлении 200 МПа.

Снижение жесткости напряженного состояния вызывает эффект разупрочнения основного металла у поверхности узла, выражающийся в том, что максимальные эквивалентные напряжения на кромке стыка превышают напряжение от приложенной осевой нагрузки.

Таким образом, если в упругой стадии деформирования мягкой прослойки коэффициент жесткости напряженного состояния, а, соответственно, и степень разупрочнения основного металла зависят только от соотношения модулей упругости и коэффициентов Пуассона основного металла и прослойки, и не зависят от величины приложенной осевой нагрузки, в пластической стадии проявляется также зависимость от степени перегрузки прослойки.

Для удобства сравнения двух стадий нагружения на рис. 3 приведена зависимость коэффициента разупрочнения во всем диапазоне нагружения, включая упругую и пластическую стадии работы прослойки, с изменением степени перегрузки прослойки от 1,0 до 2,0.

Из рис. 3 хорошо видно, что во второй (упругопластической) стадии нагружения узла разупрочнение основного металла более выражено, что можно объяснить заметным увеличением ко-

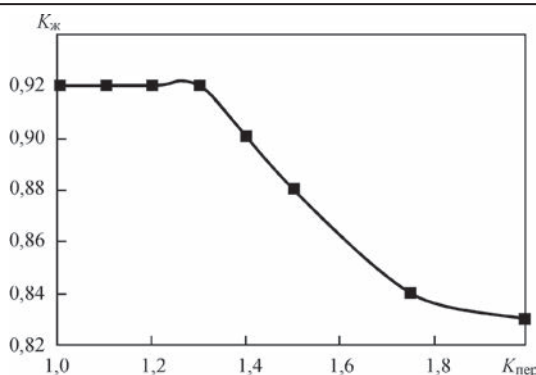


Рис. 3. Зависимость коэффициента разупрочнения и соответственно жесткости напряженного состояния $K_{ж}$ основного металла вблизи кромки стыка от степени перегрузки мягкой прослойки $K_{пер}$

эфициента Пуассона (до 0,5) и малым коэффициентом упрочнения материала прослойки при пластическом его деформировании. Кроме того, если в упругой стадии степень разупрочнения основного металла определяется только соотношением свойств его и прослойки, то в пластической стадии она зависит также и от величины нагрузки (степени перегрузки прослойки).

В материале прослойки эквивалентные напряжения (рис. 2, б) остаются постоянными на уровне ниже предела текучести (100 МПа), несколько увеличиваясь на кромке только при нагрузке до 130 МПа. При увеличении нагрузки от 100 до 130 МПа эквивалентные напряжения в прослойке линейно увеличиваются на большей части ее длины от 71 до 93 МПа и на кромке от 75 до 98 МПа (рис. 2, б). При нагрузке от 140 до 200 МПа эквивалентные напряжения в прослойке на всей длине стыка, включая кромку, остаются на постоянном уровне, близком к пределу текучести прослойки (100 МПа). Это подтверждает, что материал прослойки с пределом текучести 100 МПа за счет повышения жесткости напряженного состояния в упругой стадии упрочняется и начинает пластически деформироваться только при нагрузке выше 130 МПа.

Соответственно изменяется и коэффициент упрочнения (жесткости напряженного состояния) прослойки. При нагрузке от 100 до 130 МПа он остается практически постоянным на уровне 1,4 на большей части стыка и 1,33 вблизи его кромки. При нагрузке выше 140 МПа он, в отличие от упругого нагружения, линейно растет и достигает величины 1,97 при 200 МПа. Его зависимость от степени перегрузки прослойки в этом диапазоне нагрузок линейна и описывается уравнением регрессии $K_{ж} = 0,98K_{пер} + 0,03$, т. е. коэффициент жесткости напряженного состояния (коэффициент упрочнения) прослойки практически равен степени ее перегрузки ($K_{ж} = K_{пер}$) (рис. 4).

Анализ эпюр касательных напряжений вдоль стыка показал, что на большей части стыка (око-

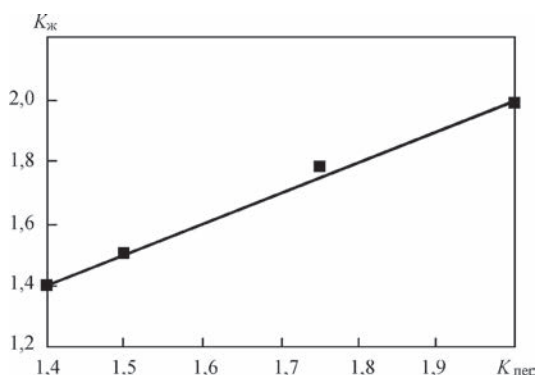


Рис. 4. Зависимость коэффициента упрочнения (жесткости напряженного состояния $K_{ж}$) прослойки от степени перегрузки «мягкой» прослойки $K_{пер}$

ло 95 %) они равны нулю, появляясь и возрастая только вблизи его кромки, на расстоянии около двух толщин прослойки (около 0,1 мм) от внешней поверхности, до 12...17 МПа. Это свидетельствует о малой эффективности чисто силового нагружения с точки зрения активации процесса пластического деформирования и образования соединения при традиционной технологии диффузионной сварки.

Характер распределения осевых напряжений вдоль образующей (внешней поверхности) узла практически одинаков при всех вариантах нагружения. Вдоль образующей (внешней поверхности) узла вблизи прослойки, в зоне шириной до двух ее толщин, они распределены неравномерно, изменяясь в пределах 70...120 МПа в прослойке и 100...170 МПа в основном металле при упругом нагружении прослойки (рис. 5, а) и 85...120 и 140...255 МПа, соответственно, при упругопластическом (рис. 5, б). При этом пик (максимум) осевых напряжений, заметно превышающий уровень напряжений от приложенной внешней нагрузки, располагается в основном металле в непосредственной близости от стыка с прослойкой.

Это свидетельствует о том, что в случае достаточного упрочнения мягкой прослойки разрушение может произойти по более прочному основному металлу на стыке с прослойкой, где разупрочнение (снижение предела текучести) соединяемого материала сочетается с повышением осевых напряжений. В соответствии с экспериментальными данными, полученными на образцах из армко-железа, паяных медью, приведенным в работе [9], при толщине прослойки меди около 0,05 мм, разрушение при испытании на растяжение происходило по железу при напряжениях в узле 325...350 МПа, что более, чем в 1,5 раза превышает предел прочности меди.

Установленные общие закономерности формирования НС в узлах с мягкой прослойкой, выражающиеся в повышении жесткости напряженного состояния, упрочнении мягкой прослойки, сни-

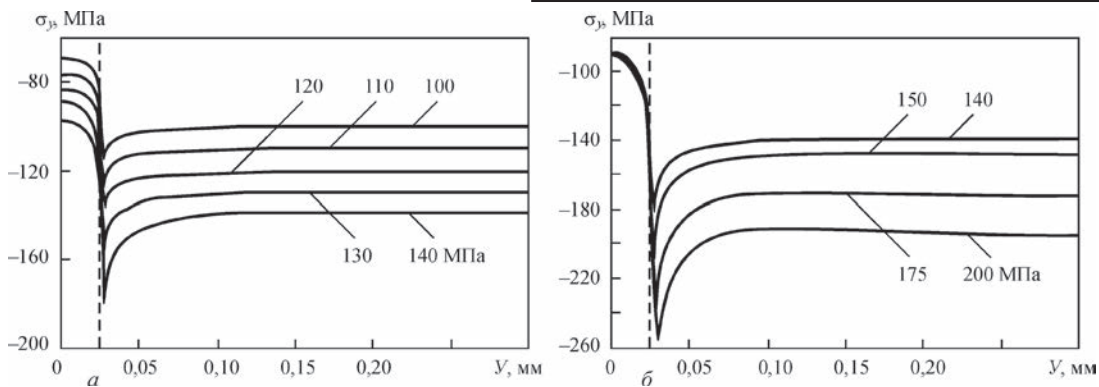


Рис. 5. Эпюры осевых напряжений вдоль образующей при осевых нагрузках 100...130 МПа (а) и 140...200 МПа (б)

жении жесткости НС в основном металле вблизи прослойки и снижении его прочности (разупрочнении) сохраняются как при упругом, так и пластическом нагружении в широком диапазоне нагрузок.

Для определения влияния уровня предела текучести прослойки на установленные закономерности был рассмотрен также вариант прослойки с более высоким пределом текучести 150 МПа.

Прикладывалась осевая нагрузка 150 МПа, т. е. равная пределу текучести прослойки, 200 и 250 МПа, которая превышала предел текучести прослойки (степень перегрузки), соответственно в 1,33 и 1,67 раза.

Анализ эпюр эквивалентных напряжений вдоль стыка при таких условиях нагружения и их сравнение с предыдущим вариантом узла (предел текучести прослойки 100 МПа) показал, что характер эпюр как в основном материале, так и в прослойке сохраняется. В основном материале на большей части стыка эквивалентные напряжения не изменяются, оставаясь на уровне напряжений от приложенной нагрузки. У кромки стыка они увеличиваются до 163, 220 и 295 МПа при нагружении 150, 200 и 250 МПа, соответственно. Коэффициенты жесткости напряженного состояния в основном металле на большей части стыка остаются на уровне 1,0, а у кромки стыка при нагрузке 150 МПа (степень перегрузки прослойки $K_{пер} = 1,0$) коэффициент жесткости напряженного состояния основного металла $K_{ж} = \sigma_y / \sigma_{эжв} = 150 / 163 = 0,92$, что полностью совпадает с вариантом узла с пределом текучести 100 МПа при той же степени перегрузки. Аналогичные результаты получены и при нагрузках 200 и 250 МПа.

В прослойке на большей части стыка эквивалентные напряжения также остаются постоянными, на уровне ниже предела текучести (107 и 143 МПа) при степени перегрузки прослойки 1,0 и 1,33 и на уровне предела текучести (150 МПа) при степени перегрузки прослойки 1,67.

При нагрузке 150 МПа (степень перегрузки прослойки $K_{пер} = 1,0$) коэффициент жесткости напряженного состояния прослойки $K_{ж} = 150 / 107 =$

$= 1,40$, что практически совпадает с результатом 1,41, полученным для узла с прослойкой с пределом текучести 100 МПа. Аналогичная картина и при нагрузках 200 и 250 МПа, при которых $K_{ж} = 200 / 143 = 1,40$ и $K_{ж} = 250 / 150 = 1,67$, соответственно, что полностью совпадает с результатами, полученным для узла с прослойкой с пределом текучести 100 МПа.

У кромки стыка при малой степени перегрузки прослойки (степень перегрузки 1,0 и 1,33), когда прослойка деформируется упруго, эквивалентные напряжения возрастают до 113 и 150 МПа, соответственно возрастает и коэффициент жесткости напряженного состояния $K_{ж} = 150 / 113 = 1,33$ и $K_{ж} = 200 / 150 = 1,33$, что также полностью совпадает с упругой стадией работы прослойки с пределом текучести 100 МПа.

Следует иметь в виду, что полученные закономерности сохраняют свою силу только при условии работы основного металла в упругой стадии. Для этого он должен иметь предел текучести выше максимальной прикладываемой к узлу осевой нагрузки. Необходимая степень превышения зависит от степени перегрузки мягкой прослойки и соответствующего ей коэффициента разупрочнения основного металла. По данным настоящей работы при степени перегрузки прослойки равной 2,0 коэффициент разупрочнения основного металла составляет 0,83, т. е. предел текучести основного металла для обеспечения его упругой работы должен быть больше $200 / 0,83 = 241$ МПа, т. е. превышать предел текучести прослойки (100 МПа) не менее, чем в 2,4 раза. При большей нагрузке появляются пластические деформации и в основном металле, их влияние на НС узла требует отдельного изучения.

Таким образом, при количественной оценке поведения узлов с мягкими прослойками, имеющими различные значения предела текучести, при разных уровнях осевых нагрузок удобно использовать понятие степень перегрузки прослойки, которая равна отношению величины осевой нагрузки к пределу текучести материала прослойки ($K_{пер} = \sigma_y / \sigma_{тпр}$).

При достаточно высоком пределе текучести основного материала, превышающем уровень напряжений от приложенной нагрузки, когда упругопластически деформируется только мягкая прослойка, полученные закономерности разупрочнения основного металла и упрочнения мягкой прослойки сохраняют силу как в упругой, так и пластической стадиях работы материала прослойки при различных уровнях ее предела текучести и приложенной осевой нагрузки.

Выводы

1. При нагружении узла с мягкой прослойкой осевой нагрузкой в материале прослойки и в небольшой зоне основного металла, прилегающей к прослойке вблизи ее кромки, формируется объемное НС. Это объясняет изменение параметров прочности и пластичности металла, найденных в условиях линейного напряженного состояния, т. е. упрочнение или разупрочнение основного металла и прослойки.

2. Установлено, что коэффициент жесткости напряженного состояния, определяющий степень упрочнения или разупрочнения прослойки и основного металла, в материале прослойки в упругой стадии постоянный, для принятых вариантов сочетания упругих свойств равен 1,35. В пластической стадии $K_{\text{ж}}$ линейно растет, достигая величины 1,97 при нагрузке вдвое превышающей предел текучести материала прослойки при стандартных испытаниях.

3. Коэффициент разупрочнения основного металла вблизи кромки стыка с прослойкой зависит не только от свойств прослойки, но и от степени ее перегрузки, для рассмотренных вариантов постепенно от 0,925 при упругом деформировании прослойки приближаясь к 0,83 при увеличении коэффициента ее перегрузки до 2,0.

4. Максимальные осевые напряжения, заметно превышающие уровень напряжений от приложенной внешней нагрузки, возникают на образующей узла в основном металле в непосредственной близости от стыка с прослойкой. В случае достаточного упрочнения мягкой прослойки разрушение может произойти по более прочному основному металлу, где разупрочнение соединяемого материала сочетается с повышением осевых напряжений.

Список литературы

1. Бакши О. А., Шрон Р. З. (1962) Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой. *Сварочное производство*, **5**, 6–10.
2. Бакши О. А., Качанов Л. М. (1965) О напряженном состоянии пластичной прослойки при осимметричной деформации. *Изв. АН СССР. Механика*, **2**, 134–137.
3. Бакши О. А., Шрон Р. З. (1971) О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой. *Сварочное производство*, **3**, 3–5.

4. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В. (2009) Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке материалов с разными физико-механическими свойствами. В *Сб. тр. четвертой междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*, 27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Украина. Махненко В. И. (ред.). Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, сс. 95–102.
5. Махненко В. И., Квасницкий В. В. (2009) Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой. *Автоматическая сварка*, **8**, 11–16.
6. Колесар И. А., Ермолаев Г. В. (2014) Напряженно-деформированное состояние при силовом и температурном нагружении узлов из разнородных сталей с мягкой прослойкой. *Там же*, **8**, 23–27.
7. Ermolaev G. V., Martynenko V. A., Olekseenko S. V. et al. (2017) Effect of the Rigid Interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under Thermal Loading. *Strength of Materials*, **49**, **3**, 422–428.
8. Копельман Л. А. (2010) *Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие. 2-е изд.* Санкт-Петербург, Изд-во «Лань».
9. Ермолаев Г. В., Квасницкий В. В., Квасницкий В. Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Хоруннов В. Ф., Квасницкий В. Ф. (ред-и). Миколаїв, НУК.

References

1. Bakshi, O.A., Shron, R.Z. (1962) Strength at static tension of welded joints with soft interlayer. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 6–10 [in Russian].
2. Bakshi, O.A., Kachanov, L.M. (1965) On stress state of plastic interlayer at axisymmetric deformation. *Izv. AN SSSR. Mekhanika*, **2**, 134–137 [in Russian].
3. Bakshi, O.A., Shron, R.Z. (1971) On calculated evaluation of strength of welded joints with soft interlayer. *Svarochn. Proizvodstvo*, **3**, 3–5 [in Russian].
4. Makhnenko, V.I., Kvasnytskyi, V.V., Yermolayev, G.V. (2009) Stress-strain state in diffusion welding of materials with different physico-mechanical properties. In: *Proc. of 4th Intern. Conf. on Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes (27–30 May 2008, Katsiveli, Ukraine)*. Ed. by V.I. Makhnenko. Kiev, PWI, 95–102.
5. Makhnenko, V.I., Kvasnytskyi, V.V. (2009) Peculiarities of formation of stress-strain state in diffusion bonds between dissimilar materials. *The Paton Welding J.*, **8**, 7–11.
6. Kolesar, I.A., Yermolayev, G.V. (2014) Stress-strain state at force and temperature loading of assemblies from dissimilar steels with soft interlayer. *Ibid.*, **8**, 21–25.
7. Yermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, **49**(3), 422–428.
8. Kopelman, L.A. (2010) *Fundamentals of strength theory of welded joints: Manual*. 2nd Ed. St-Petersburg, Izd-vo Lan [in Russian].
9. Yermolayev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytsky, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials*. Ed. by V.F. Khorunov et al. Mykolayiv, NUK [in Ukrainian].

В. В. Квасницкий^{1,3}, В. Ф. Квасницкий², Dong Chunlin³,
М. В. Матвієнко², Г. В. Ермолаєв²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова. 54025, м. Миколаїв,

просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

³China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding, Guangzhou,
P. R. China. E-mail: dchunlin@163.com

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ЗВАРНИХ ТА ПАЯНИХ ВУЗЛІВ З ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ ПРИ ОСЬОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Методом комп'ютерного моделювання досліджено напружений стан в вузлах, отриманих дифузійним зварюванням і пайкою, під дією осьового навантаження. Розглянуто циліндричні вузли зі сталі з прошарком міді з навантаженням вище межі текучості міді. Показано, що в результаті формування складного напруженого стану рівень еквівалентних напружень в прошарку знижується в порівнянні з доданим осьовим навантаженням і підвищується в невеликій зоні основного металу поблизу зовнішньої поверхні у стикі з прошарком, що викликає ефект зміцнення (розвантаження) прошарку і знеміцнення (перевантаження) основного металу. Отримано кількісні залежності ступеня зміцнення прошарку і знеміцнення основного металу від величини зовнішнього навантаження. Встановлено, що в пружнопластичній стадії навантаження вузла знеміцнення основного металу більш виражено, ніж в пружній. Ступінь зміцнення прошарку в пружній стадії її роботи не залежить від величини зовнішнього навантаження, а в пружнопластичній стадії зростає пропорційно навантаженню. Бібліогр. 9, рис. 5.

Ключові слова: зварні і паяні вузли, м'який прошарок, комп'ютерне моделювання, напружений стан, силове навантаження

V.V. Kvasnitskii^{1,3}, V.F. Kvasnitskii², Dong Chunlin³,
M.V. Matvienko², G.V. Ermolaev²

¹NTUU «Igor Sikorskii Kiev Polytechnic Institute».

37 Pobedi prosp., 03056, Kiev. E-mail: kvas69@ukr.net

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

9 Heroev Ukrainy prosp., 54025, Nikolaev.

E-mail: welding @nuos.edu.ua

³China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding.

Guangzhou, P.R.China. E-mail: dchunlin@163.com

STRESSED STATE OF WELDED AND BRAZED COMPONENTS FROM SIMILAR MATERIALS WITH A SOFT INTERLAYER UNDER AXIAL LOADING

Computer modeling method was used to study the stressed state in components, manufactured by diffusion welding and brazing, under the impact of axial load. Cylindrical components from steel with a copper interlayer are considered under loading above the copper yield point. It is shown that formation of a complex stressed state resulted in the level of equivalent stresses decreasing in the interlayer compared to the applied axial load, and increasing in a small zone of base metal near the outer surface at the butt with the interlayer that causes the effect of strengthening (unloading) of the interlayer and softening (overloading) of base metal. Quantitative dependencies of the degree of interlayer strengthening and base metal softening on outer load magnitude were derived. It is found that at the elastoplastic stage of component loading base metal softening is less pronounced, than at the elastic stage. Degree of interlayer strengthening at the elastic stage of its work does not depend on the magnitude of outer load, and at the elastoplastic stage it is increased in proportion to the load. 9 Ref., 5 Fig.

Keywords: welded and brazed components, soft interlayer, computer modeling, stressed state, force loading

Поступила в редакцію 12.02.2018

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



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

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И НАПЛАВКЕ МОНЕЛЬ-МЕТАЛЛА НА СТАЛЬ

В. А. АНОШИН, В. М. ИЛЮШЕНКО, Е. П. ЛУКЬЯНЧЕНКО

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

Исследовано влияние основных примесей на образование трещин при сварке медно-никелевых сплавов, в том числе при сварке и наплавке монель-металла на сталь. Методами оптической металлографии и электронно-фрактографического анализа установлено, что трещины носят межкристаллитный и кристаллизационный характер. Эмиссионным рентгеноспектральным анализом установлено значительное (в 27 раз) обогащение серой поверхности трещин, образующихся при сварке монель-металла. Показано, что кислород усиливает вредное действие серы при наплавке монель-металла в отличие от сварки низкоуглеродистой стали. Проведенные теоретические расчеты значительного обогащения границ зерен вредными примесями с малым коэффициентом распределения представляют интерес для объяснения причин образования кристаллизационных трещин на других никелевых сплавах. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: медно-никелевые сплавы, вредные примеси, кристаллизационные трещины

Медно-никелевые сплавы, отличаясь повышенными механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью, широко применяются в морском судостроении и химическом машиностроении для изготовления деталей, работающих в различных агрессивных средах. Весьма перспективными являются сложнолегированные медно-никелевые сплавы, содержащие добавки таких элементов как алюминий, железо и марганец. В связи с этим актуальной является задача исследования свариваемости этих сплавов.

Настоящая работа является продолжением исследований по оценке влияния примесей на свариваемость меди [1], в частности, применительно к медно-никелевым сплавам, а также никель-медному сплаву монель-металл.

Предварительная оценка свариваемости опытных сплавов МНЖ5-1; МНАЖМц6-1,5-1-1; МНЖМцА13-1,5-3-1 проводилась по методике, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона с использованием образцов ЛТПМ и «рыбий скелет» [1].

Электронно-фрактографический и металлографический анализы поверхности трещин показали их межкристаллитный и кристаллизационный характер (рис. 1).

На рис. 2 представлена трещина по оплавленным границам зерен в околошовной зоне сплава МНЖМцА13-1,5-3-1. Методом эмиссионного рентгеноспектрального анализа установлено, что поверхности трещин обогащены вредными примесями (свинцом, фосфором, висмутом) в 3...5 раз. Для оценки влияния этих примесей на свариваемость сплава МНЖ5-1 были выплавлены опытные слитки с различным их содержанием.

Из этих слитков вырезались образцы для оценки склонности сплавов к образованию трещин. На рис. 3 представлена зависимость показателя $K_{тр}$ для опытного сплава, содержащего различные концентрации висмута свинца, фосфора.

Изучена также склонность к образованию трещин при сварке и наплавке монель-металла марки НМЖМц28-2,5-1,5 на сталь. Сварка образцов из монель-металла производилась в среде аргона неплавящимся электродом по методике, указанной выше. Наплавка производилась на низкоуглеродистую сталь толщиной 20 мм под флюсом АН-26С стандартной проволокой марки НМЖМц28-2,5-1,5 диаметром 3 мм. Установлено, что характер трещин такой же, как и для медно-никелевых сплавов. Поверхность трещин в основном обогащена серой (в 27 раз). Проведенные расчеты по формуле Смита* [2] (результаты приведены в таблице) также свидетельствуют о значительном обогащении границ зерен примесями по сравнению с исходной концентрацией C_0 (например, серы с $K_0 \approx 0,005$ для монель-металла).

Следует отметить, что при наплавке монель-металла на сталь под окисленным флюсом АН-18 наблюдается повышенная склонность к образованию трещин. Поэтому проведены опыты по изучению совместного влияния кислорода и серы на образование трещин по методике В. В. Подгаецкого [4]. На рис. 4 представлены результаты исследования совместного влияния кислорода

* Необходимо отметить, что в формуле Смита, которая приведена в тексте работы [2] допущена ошибка: вместо коэффициента $(2n - 1)$ должно быть $(2n + 1)$. Эта ошибка автоматически перешла в работы Н. Н. Прохорова [3, стр. 377] и др. авторов. В то же время в приложении к работе [2] формула записана правильно.

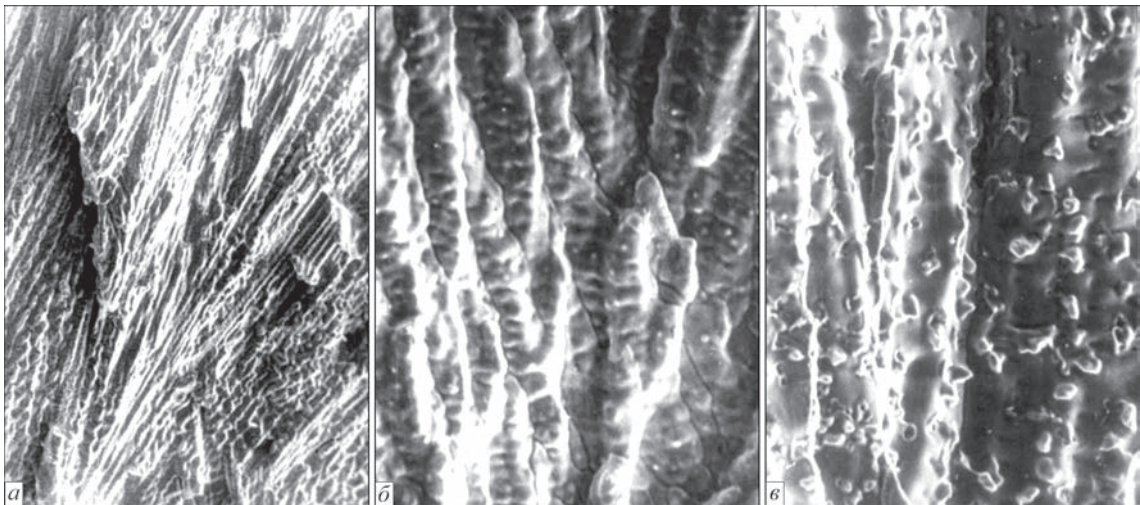


Рис. 1. Межкристаллитный (а, ×150) и кристаллизационный (б, ×800, в, ×1200) характер трещин при сварке монель-металла

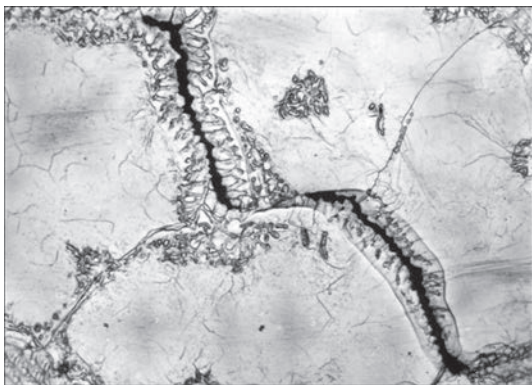


Рис. 2. Трещина по оплавленным границам зерен в околошов-ной зоне сплава МНЖМцА13-1,5-3-1

и серы на образование трещин при наплавке монель-металла на сталь. Как видно из полученных данных, с увеличением содержания кислорода в шве уменьшается критическое содержание серы, при котором в швах возникают трещины. При больших концентрациях кислорода и малых содержаниях серы возникают микротрещины, которые не развиваются вследствие малого количества серы в металле шва. Учитывая, что химическое сродство к сере у меди и никеля при температурах кристаллизации больше чем у железа, при наплавке монель-металла более вероятно появление сульфидов Cu_2S и Ni_3S_2 , которые образуют эвтектику с температурой плавления 728°C или трой-

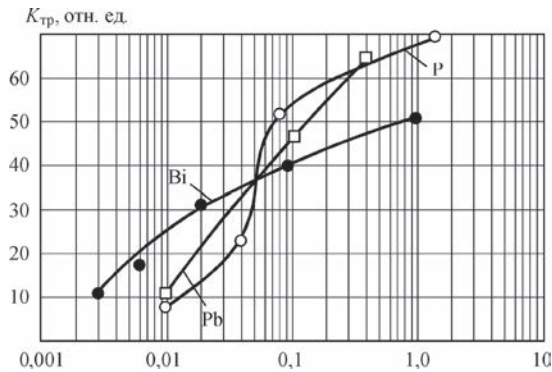


Рис. 3. Зависимость показателя $K_{\text{тр}}$ для сплава МНЖ5-1 от концентрации висмута, свинца и фосфора в нем

ную эвтектику системы Ni-Cu-S . Введение кислорода еще больше снижает температуру эвтектики и, по-видимому, увеличивает поверхностную активность серы в отличие от низкоуглеродистой стали, где, как известно [4], кислород уменьшает вредное влияние серы на образование кристаллизационных трещин.

Фосфор оказывает такое же влияние, как и сера. При содержании фосфора в шве более 0,045 % появляются типичные межкристаллитные трещины как при наплавке на сталь, так и при сварке монель-металла.

При сварке никелевого сплава (INCONEL 690) кристаллизационные трещины также возникают из-за образования межзеренных жидких просло-

Относительная сегрегация примеси на различном расстоянии X_2 от границы зерен в зависимости от коэффициента распределения

$\nu_{\text{кр}},$ см/с	$C_{\text{тв}}(X_2)/C_0$											
	$K = 0,1$			$K = 0,02$			$K = 0,005$			$K = 0,001$		
	$X_2, \text{ см}$											
	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
0,01	256,0	60,0	32,0	437,0	90,5	46,0	480,0	97,0	49,0	497,0	100,0	50,0
0,05	60,0	14,	8,0	90,5	19,0	10,0	97,0	20,0	10,0	100,0	20,3	10,3
0,1	32,0	8,0	4,0	46,0	10,0	5,0	49,0	10,0	5,3	50,0	10,3	5,3
0,5	8,0	2,0	1,3	10,0	2,3	1,4	10,0	2,3	1,4	10,3	2,4	1,4
1,0	4,0	1,3	1,0	5,0	1,4	1,0	5,3	1,4	1,0	5,3	1,4	1,0

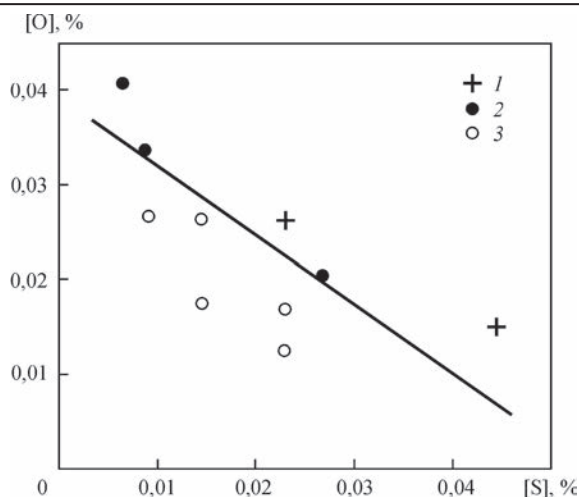


Рис. 4. Совместное влияние содержания серы и кислорода в металле шва на образование трещин при наплавке монель-металла на сталь: 1 — трещины; 2 — микротрещины; 3 — трещин нет

ек [5], на наш взгляд, также обогащенных серой из-за малого коэффициента $K_o^s \approx 0,001$ в никеле. Таким образом, результаты проведенных экспериментов показывают, что изученные элементы (висмут, свинец, фосфор) увеличивают склонность швов к образованию трещин при сварке медно-никелевых сплавов и серы в монель-металле. Являясь поверхностно-активными элементами, они снижают деформационную способность кристаллизующегося металла [6], и, вследствие проявления эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности, вызывают образование кристаллизационных трещин.

Выводы

1 Исследовано влияние основных примесей (свинца, фосфора, висмута) на склонность медно-никелевых сплавов к образованию горячих трещин, установлен их межкристаллитный характер. Показано значительное обогащение серой (в 27 раз) поверхности трещин при сварке монель-металла.

2. Установлено, что кислород при сварке и наплавке монель-металла в отличие от низкоуглеродистой стали усиливает вредное действие серы.

3. Подтверждено, что вредные примеси, как и при сварке меди, являясь поверхностно-активными элементами, вследствие проявления эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности, вызывают образование кристаллизационных трещин.

Список литературы

1. Аношин В. А., Илюшенко В. М., Бондаренко А. Н. и др. (2014) Комплексная оценка влияния основных примесей на свариваемость меди. *Автоматическая сварка*, **11**, 27–30.
2. Smith V. G., Tiller W. A., Rutter G. W. (1955) A mathematical of solute redistribution during solidification. *Canad. J. Phys.*, **33**, **1**, 723–745.

3. Прохоров Н. Н. (1968) *Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1. Элементы физики металлов и процесс кристаллизации*. Москва, Металлургия.
4. Подгаецкий В. В., Парфессо Г. И. (1977) *Трещины сульфидного происхождения при сварке стали*. Киев, Наукова думка.
5. Ющенко К. А., Савченко В. С., Червяков Н. О. (2011) Сравнительная оценка чувствительности к образованию горячих трещин сварных соединений сплава INCONEL 690. *Автоматическая сварка*, **11**, 4–10.
6. Аношин В. А., Гуревич С. М., Илюшенко В. М., Баранова В. Н. и др. (1981) Влияние поверхностноактивных элементов на деформационную способность никеля и монель-металла. *Там же*, **7**, 46–48.

References

1. Anoshin, V.A., Ilyushenko, V.M., Bondarenko, A.N. et al. (2014) Integrated evaluation of effect of main impurities on weldability of copper. *The Paton Welding J.*, **11**, 24-27.
2. Smith, V.G., Tiller, W.A., Rutter, G.W. (1955) A mathematical of solute redistribution during solidification. *Canad. J. Phys.*, **33**(2), 723-745.
3. Prokhorov, N.N. (1968) *Physical processes in metals during welding. Vol. 1: Elements of physics of metals and solidification process*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Podgaetsky, V.V., Parfesso, G.I. (1977) *Cracks of sulfide origin in welding of steel*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Yushchenko, K.A., Savchenko, V.S., Chervyakov, N.O. et al. (2011) Comparative evaluation of sensitivity of welded joints on alloy Inconel 690 to hot cracking. *The Paton Welding J.*, **11**, 2-7.
6. Anoshin, V.A., Gurevich, S.M., Ilyushenko, V.M., Baranova, V.N. et al. (1981) Effect of surface-active elements on deformation capacity of nickel and monel. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 46-48 [in Russian].

В. А. Аношин, В. М. Илюшенко, С. П. Лук'яненко

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

ВПЛИВ ОСНОВНИХ ДОМІШОК НА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН ПРИ ЗВАРЮВАННІ МІДНО-НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ І НАПЛАВЛЕННІ МОНЕЛЬ-МЕТАЛУ НА СТАЛЬ

Досліджено вплив основних домішок на утворення тріщин при зварюванні мідно-нікелевих сплавів, в тому числі під час зварювання і наплавлення монель-металу на сталь. Методами оптичної металографії і електронно-фрактографічного аналізу встановлено, що тріщини носять міжкристалітний і кристалізаційний характер. Емісійним рентгеноспектральним аналізом встановлено значне (в 27 разів) збагачення сіркою поверхні тріщин, що утворюються при зварюванні монель-металу. Показано, що кисень посилює шкідливу дію сірки при наплавленні монель-металу на відміну від зварювання низьковуглецевої сталі. Проведені теоретичні розрахунки значного збагачення границь зерен шкідливими домішками з малим коефіцієнтом розподілу представляють інтерес для пояснення причин утворення кристалізаційних тріщин на інших нікелевих сплавах. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: мідно-нікелеві сплави, шкідливі домішки, кристалізаційні тріщини

V. A. Anshin, V. M. Il'yashenko and E. P. Lyubchik

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

EFFECT OF BASIC ADDITIVES ON FORMATION OF CRACKS IN WELDING OF COPPER-NICKEL ALLOYS AND SURFACING OF MONEL ON STEEL

Effect of basic additives on formation of cracks in welding of copper-nickel alloys, including in welding and surfacing of monel-metal on steel, was investigated. Methods of optical metallography

and electron-fractography analysis determined that the cracks have intragranular and solidification nature. Emission X-ray spectrum analysis determined significant (27 times) enrichment of grain surface of crack formation in monel welding. It is shown that oxygen intensifies detrimental effect of sulfur in monel surfacing in contrast to welding of low-carbon steel. Carried out detailed calculations of significant saturation of boundaries of grains with detrimental impurities with small coefficient of distribution are of interest for explaining the reason of solidification crack formation in high strength alloys. Ref., 1 Tab., 4 Fig

Keywords: copper-nickel alloys, detrimental impurities, solidification cracks

Поступила в редакцию 28.02.2018



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

7–8 июня 2018

г. Таллинн

Тематика

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

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

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Титан 2018: производство и применение в Украине»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 11–13 июня 2018 г.

Председатели программного комитета:
академик Б. Е. Патон, проф. В. А. Богуслаев



Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
АО «Мотор Сич»
Запорожский национальный технический университет
Международная Ассоциация «Сварка»



Тематика конференции

- Применение изделий и конструкций из титановых сплавов в авиа-двигателестроении и других отраслях промышленности.
- Литейные технологии.
- Аддитивные технологии в производстве изделий из титановых сплавов.
- Новые сплавы на основе титана и его интерметаллидных соединений.
- Прогрессивные технологии и оборудование для получения слитков титана и сплавов на его основе.
- Деформационная обработка титана.
- Структура и свойства титановых сплавов.
- Прогрессивные технологии сварки и пайки изделий из титановых сплавов.

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,
ул. Казимира Малевича, 11,
г. Киев, 03150, Украина.
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, 205-22-98
E-mail: journal@paton.kiev.ua, lanagrig@gmail.com
www.pwi-scientists.com/rus/titan2018



Информационная поддержка – журналы
«Автоматическая сварка»
и «Современная электрометаллургия».

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРЕСТОВИН С РЕЛЬСОВЫМИ ОКОНЧАНИЯМИ

А. В. КАВУНИЧЕНКО, В. И. ШВЕЦ, Е. В. АНТИПИН

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

По-прежнему актуально получение качественных сварных соединений стали 110Г13Л с рельсовыми окончаниями без промежуточной вставки. Представлены результаты исследования формирования сварных соединений из рельсовой стали М76 со сталью 110Г13Л, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением без аустенитной вставки. Показано, что в приконтактном слое рельсовой стали образуется высоколегированный нестабильный аустенит, окантованный карбидами. Установлено, что локализация внутренних напряжений и наличие охрупчивающих структур являются причиной низкой стрелы прогиба при требуемом разрушающем усилии сварных соединений. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, сталь 110Г13Л, рельсовая сталь М76, микроструктура, термообработка, неметаллические включения, внутренние напряжения, механические свойства, карбиды, нестабильный аустенит

На предприятиях железных дорог Украины используется большое количество железнодорожных крестовин, которые скреплены с рельсом болтовыми соединениями.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением железнодорожных крестовин, выполненных из стали 110Г13Л, с рельсовыми окончаниями (сталь М76) через промежуточную вставку [1]. Разработанная технология предусматривает использование в соединениях промежуточной аустенитной вставки стандартного производства без последующей термообработки [2].

Вместе с тем продолжают попытки получить качественное соединение железнодорожных крестовин, выполненных из стали 110Г13Л, с рельсовыми окончаниями напрямую (без промежуточной вставки).

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования и свойств соединений рельсовой стали со сталью 110Г13Л без промежуточной вставки при контактной стыковой сварке оплавлением (КССО).

Сварку опытной партии проводили на отливках стали 110Г13Л в форме рельсового профиля Р65 и рельсовой стали (табл. 1) по технологии, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона [3]. Параметры процесса сварки варьировались в широких пределах:

- длительность процесса сварки 60...120 с;
- припуск на сварку $24 \pm 1...30 \pm 1$ мм;
- конечная скорость форсировки 1,0...1,4 мм/с;
- величина осадки 10...14 мм.

Металлографические исследования и анализ химической неоднородности металла соединений проводили на оптическом микроскопе «Неофот 32» и микроанализаторе SX-50 фирмы «Camebax».

Проведенные исследования показали, что микроструктуры соединений рельсовой стали со сталью 110Г13Л имеют схожий характер. Поэтому для обсуждения вынесено соединение, выполненное на режиме:

- длительность процесса сварки 75 с;
- припуск на сварку 26 ± 1 мм;
- конечная скорость форсировки 1,2 мм/с;
- величина осадки 12 мм.

При анализе микроструктуры для обсуждения выделены следующие участки соединения: ЗТВ рельсовой стали, ЗТВ стали 110Г13Л, переходная зона на контактной границе.

В металле ЗТВ рельсовой стали (подобно однородному соединению) сохраняется микроструктура сорбита закалки. Влияние сварочного нагрева проявляется в увеличении размера первичных аустенитных зерен по мере приближения к линии соединения.

Таблица 1. Химический состав сталей (мас.%) и их интервал плавления

Сталь	Mn	Si	C	P	S	Cu	$T_{\text{сол}} - T_{\text{ливн}}$, °C
М76	0,81	0,029	0,724	0,007	0,014	-	1380...1470
110Г13Л	14,1	-	1,2	0,03	0,002	-	1330...1375

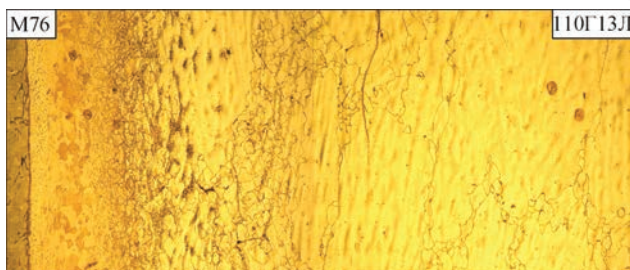


Рис. 1. Микроструктура ($\times 50$) соединения стали 110Г13Л со сталью М76

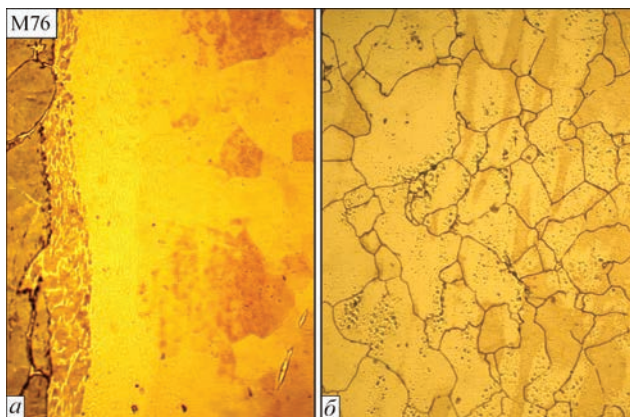


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) характерных участков металла 3ТВ стали 110Г13Л: а — приконтактный слой с частичным плавлением субграниц зерен; б — карбидная сетка по границам зерен

В отличие от рельсовой стали, сталь 110Г13Л термически нестабильна [4].

В области температур $400 \dots 700^\circ\text{C}$ уже при кратковременном нагреве возможен распад аустенита по реакции $\gamma \rightarrow \gamma_{\text{обедн.}} + (\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$. В свою очередь обедненный углеродом и марганцем аустенит может далее распасться с образованием трооститно-сорбитных структур [5].

В соединении выпадение карбидов наблюдается в участке на расстоянии около 1 мм от стыка (рис. 1). Карбиды выделяются по границам зерен. В срединной части отмеченного участка развитие процесса ведет к образованию сплошной карбидной сетки (рис. 2, б). Возможно появление растущих от границы кристаллографически ориентированных игольчатых карбидов. Необходимо отметить, что в области участка с карбидами наблюдаются мелкие глобулярные образования, природа которых требует проведения дополнительных исследований.

К линии соединения примыкает слой аустенита полиэдрической структуры, формирующийся в условиях гомогенизационного отжига. В приконтактной зоне в этом слое возможно частичное плавление субграниц зерен (рис. 2, а).

Формирование переходной зоны на контактной границе с рельсовой сталью происходит в результате твердожидкого взаимодействия с расплавом стали 110Г13Л, интервал плавления которой значительно ниже (см. табл. 1).

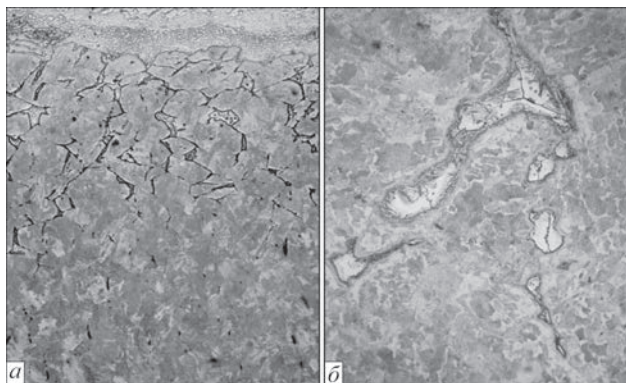


Рис. 3. МСС в рельсовой стали М76: а — $\times 50$; б — $\times 400$

При анализе микроструктуры переходной зоны установлено, что в рельсовой стали на глубине $2 \dots 3$ мм от линии соединения между блоками зерен (рис. 3) образуется структурная составляющая светлого цвета (условно названная межблочной структурной составляющей — МСС). В пределах МСС возможно присутствие неметаллических включений, эвтектических колоний.

Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа основу МСС составляет железо, содержащее, мас. %: $4 \dots 8 \text{ Mn}$ и $0,9 \dots 2,4 \text{ C}$. Микротвердость МСС около $HV_{0,2} = 2570$ соответствует микротвердости высоколегированного нестабильного аустенита. Ход кривой распределения углерода дает основание считать, что МСС окантована карбидами, предположительно $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ (рис. 4).

Представляется, формирование МСС происходит на первом этапе концентрационного плавления металла вокруг неметаллических включений, располагающихся преимущественно по границам зерен (в системах Fe-Mn-S , Fe-P , Fe-Mn-P , Fe-Cr-Ni-Ti-C существуют эвтектики с T_e около 1000°C). Затем следуют процессы диффузионного переноса в расплав элементов основного металла с более высокой растворимостью в жидкой фазе (углерод, марганец) и массоперенос расплава от границы по оплавленным зернам.

В переходной зоне соединения к рельсовой стали примыкает слой, включающий образование темного цвета неправильной формы, в некоторых случаях игольчатой. Появление этого слоя нерегулярно (рис. 5).

Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа (рис. 6) на участке переходной зоны без слоя концентрация марганца и углерода изменяется скачкообразно. Ширина диффузионных зон в обеих сталях составила около 5 мкм (рис. 6, б).

На участке со слоем, на кривой распределения марганца наблюдается ступенька шириной приблизительно 65 мкм (рис. 6, а) с промежуточным значением концентрации марганца $3,5 \dots 4,5$ мас. %.

Химический состав микрообъемов МСС, мас. % (см. рис. 4)

Но- мер п/п	Si	Cr	Ti	Ni	Fe	Mn	C
1	0,486	0,095	0,000	0,004	92,882	4,088	2,438
2	0,589	0,096	0,006	0,000	92,998	4,382	1,979
3	0,512	0,080	0,026	0,014	93,768	3,813	1,736
4	0,473	0,142	0,058	0,004	89,686	8,721	0,911

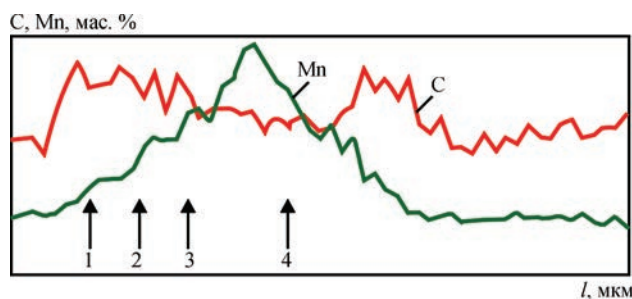


Рис. 4. Распределение углерода и марганца в МСС. Результаты анализа химического состава микрообъемов металла в пределах МСС

Концентрация углерода при этом находится на уровне таковой в стали 110Г13Л.

Очевидно, слой образовался в результате частичного растворения рельсовой стали и последующей кристаллизации избыточных фаз на остаточных частицах. В случае, когда расплав с частицами при осадке практически полностью выдавлен (или имеет место только фронтальное растворение рельсовой стали), слой отсутствует. При этом соединение формируется подобно соединениям, полученным при твердофазном взаимодействии.

Прочностные характеристики такого сварного соединения низкие. Разрушение происходит в приконтактном слое рельсовой стали на расстоянии до 2 мм от линии соединения. Критичными для прочности в условиях высоких послесварочных напряжений из-за большой разницы коэффициента теплового расширения (КТР) соединяемых сталей являются включения МСС, окантованные

карбидами, а также границы блоков зерен с выделениями карбидов.

Рассмотрена возможность трансформации нежелательных структурных составляющих с использованием термообработки. Исследовано влияние отжига при следующих режимах:

1. $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 ч., охлаждение в масло (отпуск)
2. $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 ч., охлаждение в масло (нормализация)
3. $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 ч., охлаждение в масло (гомогенизирующий отжиг).

Влияние отжига по режиму 1 сказывается на изменении твердости структурных составляющих. Возрастает твердость МСС ($HV_{0,5} = 3810$) и твердость на участках с темными образованиями в слое вдоль рельсовой стали ($HV_{0,5} = 5430$). Микротвердость собственно стали 110Г13Л и рельсовой стали в приконтактной зоне снизилась и составила $HV_{0,5} = 1600 \dots 2000$ и $HV_{0,5} = 1800 \dots 2000$, соответственно.

После перекристаллизации по режиму 2 в микроструктуре переходной зоны исчезают темные образования в слое вдоль контактной границы рельсовой стали, а также окантовка из карбидов на границе МСС с основным металлом. При этом твердость МСС возрастает до $HV_{0,5} = 5500$ (рис. 7). По-видимому, наблюдаемые изменения вызваны, с одной стороны, растворением карбидов в аустенитной матрице при температурах выше точки A_3 , с другой образованием мартенсита в метастабильном аустените МСС. Микроструктура рельсовой стали в приконтактной зоне представляет собой измельченные перлитные колонии с ферритной оторочкой и микротвердостью $HV_{0,5} = 1830$, что ниже таковой на расстоянии 4 мм от контактной границы $HV_{0,5} = 2600$. Значения микротвердости в приконтактной зоне стали Гадфильда находятся в диапазоне $HV_{0,5} = 1600 \dots 1750$.

Представляют интерес результаты гомогенизационного отжига соединения по режиму 3. Как видно (рис. 8), после термообработки МСС полностью или частично преобразуются в перлит с

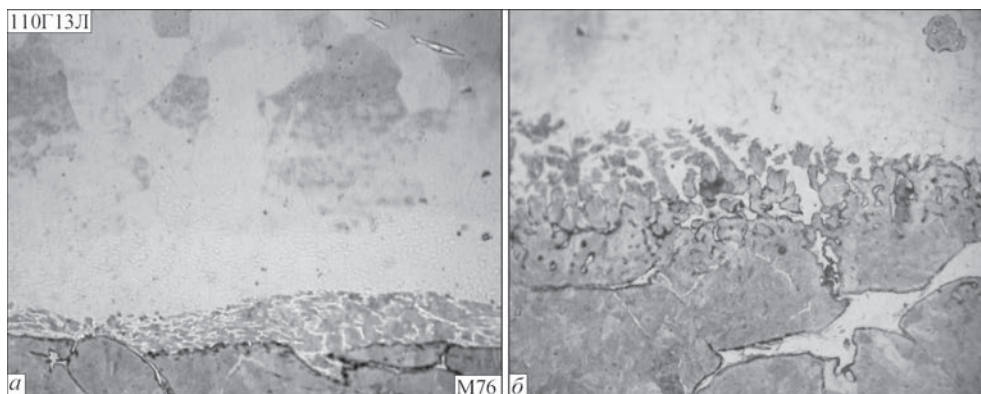
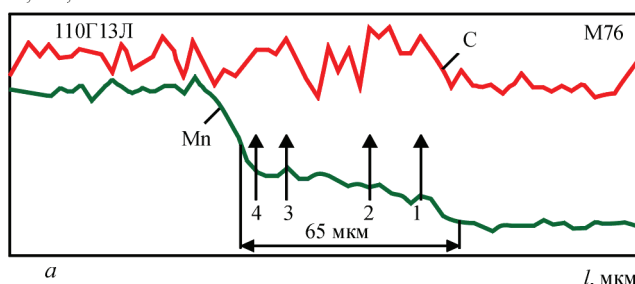


Рис. 5. Микроструктура переходной зоны на контактной границе рельсовой стали М76 и стали Гадфильда: а — $\times 200$; б — $\times 400$

Химический состав микрообъемов слоя с фрагментами со структурой закалки железоуглеродистых сталей, мас. %

Номер п/п	Si	Cr	Ti	Ni	Fe	Mn	C
1	0,453	0,056	0,025	0,000	94,882	3,877	0,707
2	0,553	0,063	0,028	0,042	94,996	4,123	0,796
3	0,445	0,062	0,027	0,007	94,275	4,879	0,620
4	0,456	0,046	0,016	0,028	90,301	4,433	0,664

C, Mn, мас. %



C, Si, Mn, мас. %

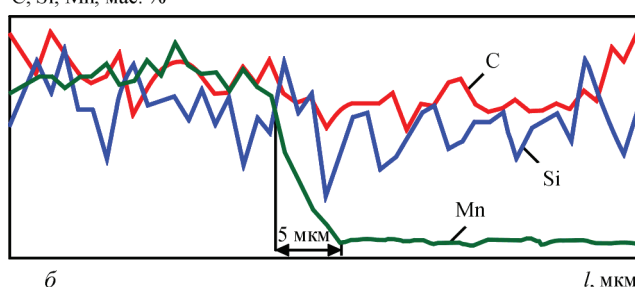


Рис. 6. Распределение элементов в переходной зоне соединения рельсовой стали М76 и стали Гадфильда на участке: а — с игольчатой фазой; б — без игольчатой фазы

микротвердостью $HV0,5 - 1850 \dots 2310$. Наблюдаемые остаточные участки МСС, окруженные перлитом, сохраняют микротвердость высоколегированного аустенита $HV0,5 - 3220 \dots 4390$.

Необходимо отметить, что микротвердость аустенитных зерен стали 110Г13Л после гомогенизирующего отжига остается на том же уровне ($HV0,5 - 2440 \dots 3200$) при значительном снижении микротвердости рельсовой стали ($HV0,5 - 1190$).

Гомогенизирующий отжиг представляется перспективным для устранения нежелательных структурных составляющих, формирующихся

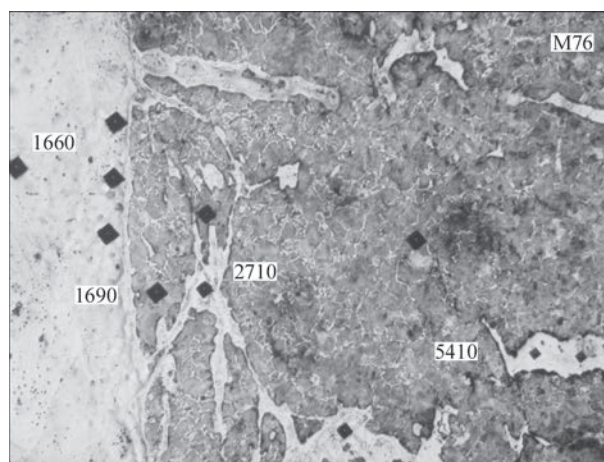


Рис. 7. Микроструктура ($\times 400$) и распределение микротвердости в соединении рельсовой стали М76 и стали Гадфильда после отжига по режиму: $T = 850^\circ\text{C}$, $\tau = 3$ ч., охлаждение в масле

в рельсовой стали. Однако возможности после-сварочной термообработки ограничены карбидообразованием в стали 110Г13Л, протекающем в интервале температур $250 \dots 950^\circ\text{C}$. Для сохранения свойств стали 110Г13Л необходима закалка от температур гомогенизации. Это чревато образованием мартенсита в рельсовой стали, что, в свою очередь, недопустимо.

В связи с тем, что разрушение сварных стыков при испытаниях на статический изгиб происходит при относительно малых стрелах прогиба, были проведены исследования по определению остаточных напряжений в сварных соединениях, которые могут снижать деформационную способность, а также усталостную прочность сварного соединения. Для расчета напряженного состояния

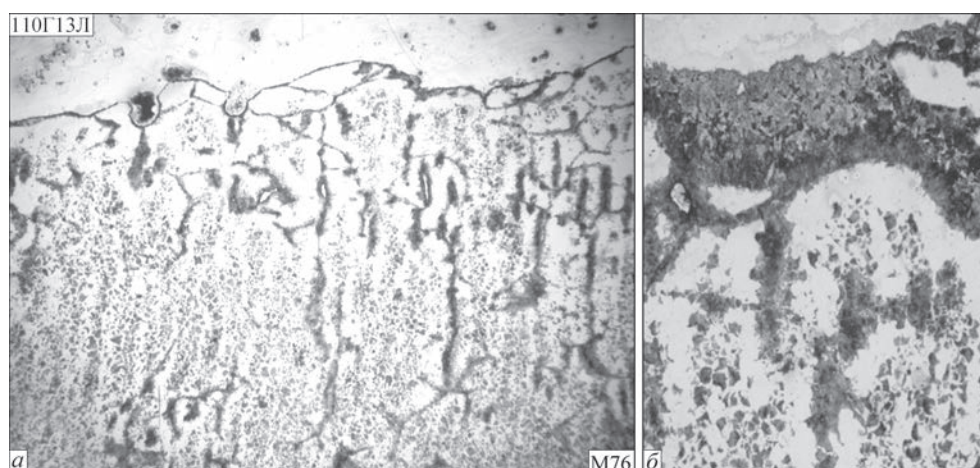


Рис. 8. Микроструктура сварного соединения рельсовой стали со сталью 110Г13Л после отжига по режиму 3: а — $\times 50$; б — $\times 400$

Таблица 2. Результаты испытаний сварных образцов на статический изгиб (профиль Р65)

Номер образца	Разрушающее усилие, кН	Стрела прогиба, мм
1	1000	12
2	900	13
3	980	17
4	1050	19
5	1000	19
6	800	11
7	1000	12
8	1100	15
9	1100	13
10	900	12
11	1150	17

использовался алгоритм численного решения задачи неизотермического пластического течения с условием текучести Мизеса.

Анализ расчетных данных остаточных напряжений, представленных на рис. 9 для соединений из стали 110Г13Л с рельсовой сталью показал, что начало образования трещин в переходной зоне соединения в шейке рельсового профиля определяется наличием растягивающих остаточных напряжений σ_{xx} , значения которых наиболее высокие в стенке вблизи перехода к подошве.

Применение режимов сварки с повышенными удельными мощностями привело к снижению уровня остаточных напряжений в сварном стыке, что позволило получать полнопрофильные сварные соединения, которые не разрушались самопроизвольно. Испытание сварных соединений полнопрофильных образцов на статический поперечный изгиб при определенном разрушающем усилии не дало стабильных результатов по стреле прогиба (стрела прогиба в пределах 8...19 мм, см. табл. 2), что не удовлетворяет требованиям украинского и европейского стандартов [6, 7].

Выводы

1. В переходной зоне соединения стали 110Г13Л с рельсовой сталью, полученного КССО, образуются структурные составляющие промежуточного химического состава.

2. В приконтактном слое рельсовой стали образуется так называемая межблочная структурная составляющая (МСС), представляющая собой высоколегированный нестабильный аустенит, окантованный карбидами.

3. В переходной зоне вдоль границы рельсовой стали образуются слои с продуктами растворения рельсовой стали и последующей кристаллизации на них карбидов.

4. Образование трещин в зоне сплавления вдоль стыка можно связать с наличием растягивающих остаточных напряжений σ_{xx} , значения кото-

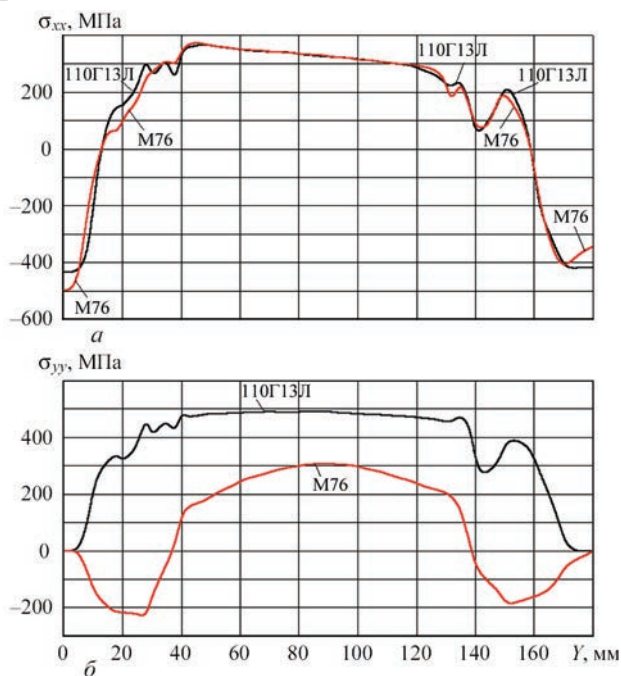


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений σ_{xx} (а) и σ_{yy} (б) вдоль стыка на расстоянии $x = 2,5$ мм (М76) и $x = -2,5$ мм (110Г13Л)

рых наиболее высокие в стенке вблизи перехода к подошве.

5. Локализация внутренних напряжений в сварном шве из-за большой разницы КТР соединяемых сталей (почти в 2 раза) и наличие охрупчивающих структурных составляющих являются причиной низкой прочности соединения.

6. Использование послесварочной термообработки проблематично в связи с несовпадением допустимых режимов термообработки для рельсовой стали и стали 110Г13Л.

7. Технологические мероприятия, предупреждающие образование указанных дефектов, должны быть направлены на повышение сопротивления материала зоны сплавления возникновению соответствующих трещин; с этих позиций применение промежуточной аустенитной вставки, содержащей никель, является одним из эффективных технологических приемов в этом направлении.

Список литературы

1. Кучук-Яценко С. И., Шве́ц Ю. В., Шве́ц В. И. и др. (2006) Особенности формирования структуры соединений рельсовой стали М76 со сталью 110Г13Л, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*, **1**, 3–9.
2. Кучук-Яценко С. И., Шве́ц Ю. В., Думчев Е. А. и др. (2005) Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку. *Там же*, **1**, 6–9.
3. Кучук-Яценко С. И., Ді́дковський О. В., Богорський М. В. та ін. (2002) *Спосіб контактного стыкового зварювання оплавленням*. Україна, Пат. 46820. В23К 11/04.
4. Грузин П. Л., Григоркин В. И., Москалева Л. Н., Мураль В. В. (1969) Превращения в аустенитной марганцови-

стой стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1**, 5–9.

5. Ткаченко Ф. К., Ефременко В. Г. (1990) Структура и фазовые превращения в деформированной высокомарганцевистой стали. *Там же*, **2**, 8–10.
6. (2006) ТУ У 27.3-26524137-1342:2006. *Хрестовини та сердечники з привареними рейковими закінченнями типів Р65, Р50 та UIC60. Технічні умови*.
7. (2012) DIN EN 14587-3:2012 *Railway applications – Track-Flash butt welding of rails. Part 3. Welding in association with crossing construction*.

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Gordan, G.N. et al. (2006) Features of formation of structure of joints of rail steel M76 to steel 110G13L made by flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **1**, 2-8.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, Yu.V., Dumchev, E.A. et al. (2005) Flash-butt welding of railway frogs with rail ends using an intermediate insert. *Ibid.*, **1**, 2-4.
3. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Bogorsky, M.V. et al. (2002) *Method of flash-butt welding*. Ukraine, Pat. 46820. Int. Cl. B23K 11/04 [in Ukrainian].
4. Gruzin, P.L., Grigorkin, V.I., Moskaleva, L.N., Mural, V.V. (1969) Transformations in austenitic manganese steel. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 5-9 [in Russian].
5. Tkachenko, F.K., Efremenko, V.G. (1990) Structure and phase transformations in wrought high-manganese steel. *Ibid.*, **2**, 8-10 [in Russian].
6. (2006) TU U 27.3-26524137-1342:2006: *Frogs and cores with welded-up rail ends of R65, R50 and UIC60 types. Specification* [in Ukrainian].
7. (2012) DIN EN 14587-3:2012: *Railway applications – Track-flash butt welding of rails. Pt 3: Welding in association with crossing construction*.

О. В. Кавуніченко, В. І. Швець, С. В. Антіпін

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

ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНОГО СТИКОВОГО
ЗВАРЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ХРЕСТОВИН
З РЕЙКОВИМИ ЗАКІНЧЕННЯМИ

Як і раніше актуальне отримання якісних зварних з'єднань сталі 110Г13Л з рейковими закінченнями без проміжної вставки. Представлено результати дослідження формування зварних з'єднань з рейкової сталі М76 зі сталлю 110Г13Л, виконаних контактним стиковим зварюванням оплавленням без аустенітної вставки. Показано, що в приконтатному шарі рейкової сталі утворюється високолегований нестабільний аустеніт, окантований карбідами. Встановлено, що локалізація внутрішніх напружень і наявність крихких структур є причиною низької стріли вигину при необхідному руйнівному зусиллі зварних з'єднань. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: контактне стикове зварювання оплавленням, сталь 110Г13Л, рейкова сталь М76, мікроструктура, термообробка, неметалеві включення, внутрішні напруження, механічні властивості, карбіди, нестабільний аустеніт

A.V. Kavunichenko, V.I. Shvets, E.V. Antipin

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

FEATURES OF FLASH-BUTT WELDING OF RAIL FROGS WITH RAIL ENDS

Producing high-quality welded joints of steel 110G13L with rail ends without intermediate insert is still an urgent problem. The results of investigations on formation of welded joints of rail steel M76 with steel 110G13L are presented, produced by flash-butt welding without austenitic insert. It was shown that in the near-contact layer of rail steel, the high-alloy unstable austenite is formed, edged by carbides. It was established that localization of inner stresses and the presence of embrittled structures are the cause of a low deflection arrow at the required fracture force of welded joints. 7 Ref., 2 Tab., 9 Fig.

Keywords: flash-butt welding, steel 110G13L, rail steel M76, microstructure, heat treatment, non-metallic inclusions, inner stresses, mechanic properties, carbides, unstable austenite

Поступила в редакцию 14.03.2018

Издательский Дом «Патон»

Предлагаем отпечатать Вашу статью, опубликованную в журнале «Автоматическая сварка» и на английском языке в журнале «The Paton Welding Journal», отдельным оттиском определенного тиража. Оттиск статьи может быть оформлен в соответствии с пожеланиями. Размещение рекламы в нем также возможно.

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



ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2. E-mail: plit4enko@ukr.net

На прикладі алюмінієвого сплаву пропонується методика визначення параметрів процесу з'єднання пластин за технологією зварювання тертям з перемішуванням. В процесі досліджень за різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та нормального притискання до з'єднуваних кромок визначено характер розігріву металу. З аналізу характеру підвищення температури розігріву з'єднуваних кромок визначено мінімальне значення температурного інтервалу при реалізації технології зварювання тертям з перемішуванням. За аналізом отриманих експериментальних даних пропонується концепція визначення основних параметрів процесу зварювання. Бібліогр. 17, рис. 9.

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням; теплова енергія; робочий інструмент; режими зварювання; сплави на основі алюмінію; оптимальна температура

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) відноситься до дифузійних технологій, яким притаманна відсутність розігріву до температур плавлення металу (рис. 1).

Основним джерелом тепла за такою технологією є сили тертя, які виникають між поверхнями металу, що зварюється, та робочою частиною спеціального інструмента [2–4].

За такою технологією інтенсивність необхідної енергії визначається комплексним впливом частоти обертання інструмента навколо власної осі, сили притискання і швидкості його переміщення уздовж з'єднувальних кромок за умов оптимальних геометричних розмірів і форми робочого інструмента [5].

Разом з цим висока чутливість процесу ЗТП до незначних змін технологічних характеристик суттєво ускладнює підтримку оптимальних умов зварювання, особливо коли зварний контур відрізняється від прямої лінії. Дійсно, за умов постійної сили притискання співвідношення між частотою обертання і швидкістю переміщення уздовж з'єднуваних кромок робочого інструмента дозволяє без ускладнень керувати процесом розігріву металу в зоні зварного шва. В протилежність цьому, складніше підтримувати стаціонарний режим зварювання при зміні лише сили притискання, коли рекомендована температура відповідає вузькому інтервалу 0,8...0,95 від температури плавлення металевих матеріалів [5, 6].

Враховуючи, що робочий інструмент визначає процес утворення та розподіл теплової енергії в зоні зварювання, розміри його складових і форма (рис. 2) суттєво впливають на якість зварного з'єднання.

Кожна з частин інструмента забезпечує виконання певних функцій при перетворенні механічної енергії тертям в теплову. Так, заплечик забезпечує отримання приблизно 80...90 % необхідної енергії для розігріву кромок [7], решта генерується штирем. Таким чином, за умов потрібного ступеню розігріву металу від механічного контакту, основний внесок в ЗТП обумовлюється заплечиком.

Детальний аналіз структурних перетворень в металі після ЗТП свідчить, що лише специфічна форма робочого інструмента забезпечує необхідний розподіл температури розігріву по перетину контактних поверхонь [3, 8].

В залежності від вирішення технологічних питань на робочій поверхні інструмента, наприклад, для руйнування оксидних плівок або підвищення ступеня перемішування металу з'єднуваних кро-

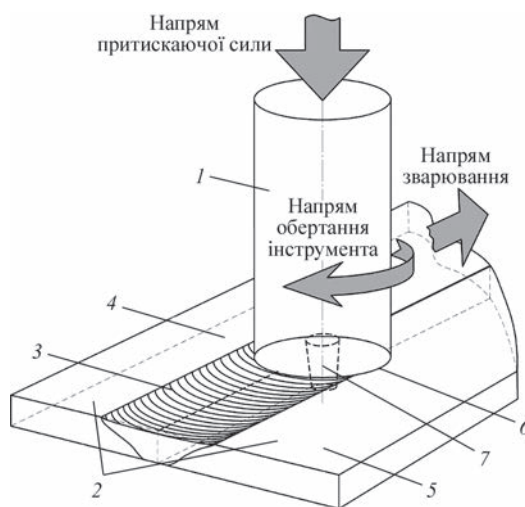


Рис. 1. Процес зварювання двох пластин [1]: 1 — інструмент; 2 — пластини; 3 — зварний шов; 4 — сторона набігу інструмента; 5 — сторона повернення інструмента; 6 — заплечик; 7 — штир

мок, може виготовлятися спеціальний рельєф [9]. За результатами досліджень робіт [2, 4, 10], виготовлення канавок сприяє досягненню підвищеного рівня комплексу властивостей металу зварного з'єднання.

В порівнянні із заплечиком штир робочого інструмента має дещо інше призначення. Його робота забезпечує перерозподіл теплової енергії, достатньої для підтримки визначених умов розвитку процесів дифузійного масопереносу металу по товщині з'єднуваних кромок за термін активної дії інструмента.

Форма штиря робочого інструмента і його діаметр мають якісну залежність від низки факторів: кута його нахилу під час зварювання, товщини основного металу, хімічного складу та ін. [7]. Нанесення на поверхню штиря канавок у вигляді нарізки допомагає керувати потоком пластифікованого металу, спрямовуючи його на ущільнення певних ділянок шва. Такий вплив зменшує вірогідність появи непровару кореня зварного шва [8].

В порівнянні з технологіями часткового або повного розплавлення використання ЗТП дозволяє суттєво зменшити ступінь перегріву металу в зоні термічного впливу шва. Перспективними напрямками застосування такої технології є з'єднання елементів з різномірних матеріалів, які утворюють гетерогенні розплави або хімічно нестабільні багатофазні суміші при кристалізації. Отримані з'єднання за традиційними технологіями, наприклад, при електричному дуговому зварюванні, можуть мати непередбачуваний негативний вплив на якість зварного з'єднання.

Метою роботи є удосконалення методики визначення радіусу заплечика робочого інструмента при ЗТП.

Матеріал і методика проведення досліджень. ЗТП проводили на спеціально розробленому устаткуванні, яке разом з вибраними параметрами робочого інструмента [10–12] забезпечувало формування зварного з'єднання.

Процес ЗТП (рис. 1) виконувався за наступною схемою: робочий інструмент 1, з певною частотою обертання навколо власної осі, розташовували під кутом $1...3^\circ$ відносно площини з'єднуваних кромок. Постійне нормальне зусилля інструмента було необхідне для занурення заплечика на глибину до 10 % товщини кромки. Виникнення сил тертя по контактних поверхнях заплечика 5, штиря 6 і з'єднуваних елементів 3 та 4 забезпечує потрібну ступінь розігріву основного металу. Дія штиря приводить до рівномірного розподілу тепла по товщині кромок. Після досягнення необхідного ступеня розігріву, метал починає перемішуватися.

Матеріалом для робочого інструмента була використана швидкорізальна сталь Р9, яка забезпе-

чує збереження форми і розмірів інструмента при підвищених температурах нагріву при реалізації технології ЗТП більшості сплавів на основі алюмінію [5]. Форма і розміри робочого інструмента (рис. 2) були визначені на основі аналізу відомих експериментальних даних [1, 3–5].

Дослідження технології ЗТП проводили на пластинах товщиною 1,85 мм зі сплаву алюмінію АМг3 з вмістом хімічних елементів в межах марочного складу.

Зміну температури в зоні зварювання та рівня притискання інструмента здійснювали за допомогою спеціально розробленого дослідницького стенду (рис. 3), який розташовували на опорній плиті 1 фрезерувального верстата. Стенд складався з елементів каркасу 2, рухомої металевої пластини 4 та теплоізолятора 5, виготовленого зі слюди. Сила притискання робочого інструмента до основного металу під час зварювання вимірювалася динамометром типу ДС-0,1 з індикаторною голівкою.

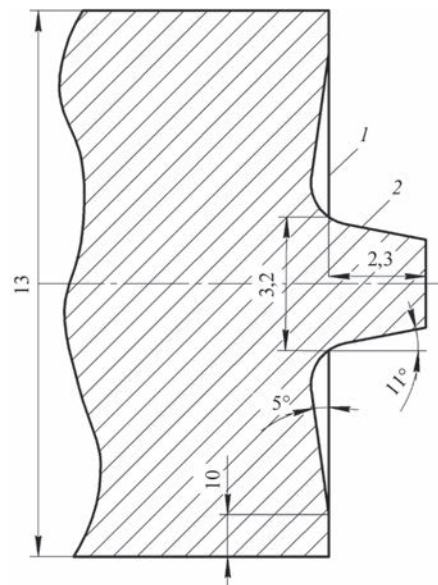


Рис. 2. Схематичне зображення робочого інструмента для ЗТП: 1 — заплечик; 2 — штир

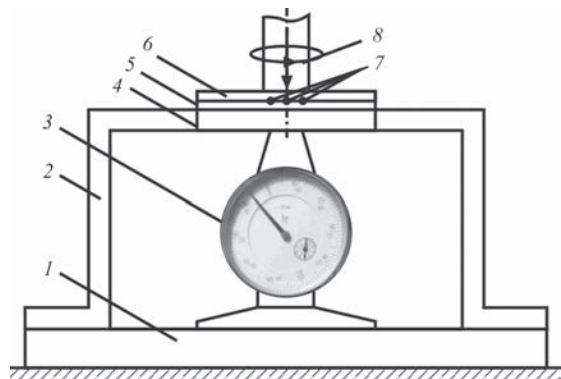


Рис. 3. Схема стенду для досліджень: 1 — опорна плита верстату; 2 — каркас стенду; 3 — динамометр; 4 — рухома плита; 5 — теплоізолятор; 6 — зварюваний зразок; 7 — термопари; 8 — робочий інструмент

Температуру розігріву з'єднуваних кромок T визначали зануреними в метал термопарами типу хромель-алюмель на різній відстані від осі зварного шва. Швидкість обертання робочого інструмента ω змінювали від 800 до 1600 хв⁻¹, при зусиллі притискання до поверхні пластин не більше 1,45 кН. Швидкість переміщення інструмента уздовж шва $v_{зв}$ була постійною і складала 50 мм/хв.

Отримані результати та обговорення. В процесі досліджень за різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та його нормального притискання до з'єднуваних кромок регулювали ступінь розігріву металу.

На рис. 4 наведені результати впливу технологічних параметрів процесу ЗТП на температуру розігріву металу в зоні дії заплечика робочого інструмента.

З аналізу характеру співвідношення $P = f(T)$ визначали оптимальну температуру розігріву металу кромок за умов різкого підвищення пластичних властивостей. Незалежно від швидкості обертання інструмента і сили його притискання значення мінімальної температури знаходились у відносно вузькому інтервалі 70...85 °С. З урахуванням можливих неконтрольованих відхилень при підтримці стабільних умов процесу зварювання, для спрощення аналізу теплового балансу, було прийнято середнє значення температури 76 °С, що відповідала моменту пластифікації сплаву.

Порівняльний аналіз з абсолютними значеннями температури початку розвитку рекристалізації T_p для різноманітних сплавів за залежністю $T_p = 0,4T_{пл}$, де $T_{пл}$ — температура плавлення металу, свідчить про достатньо якісний збіг між ними.

Детальний аналіз форми кривих $P = f(T)$ (рис. 4) з урахуванням стадійності процесів структурних перетворень за умов гарячого обтиску-

вання [13] свідчить, що від моменту формування горизонтальної ділянки до різкого зниження зусилля притискання процеси внутрішньої перебудови сплаву обумовлені розвитком у визначеному співвідношенні динамічних процесів полігонізації і рекристалізації.

Таким чином, момент формування горизонтальної ділянки може бути прийнятим в якості мінімального значення температурного інтервалу процесу ЗТП, а різке зниження T — максимально припустимим значенням.

Форма кривих і точки якісних змін співвідношення $P = f(T)$ свідчать про залежність умов досягнення надпластичного стану металу від параметрів процесу ЗТП. Дійсно, якщо температура початку пластифікації залишається практично незалежною від співвідношення ω і P , то досягнення надпластичного стану (ділянка спаду сили притискання) в більшій мірі визначається величиною ω .

З метою визначення параметру, який має найбільший вплив на пластичність сплаву для різних співвідношень швидкості обертання і сили притискання робочого інструмента, здійснили оцінку необхідної теплової енергії Q для реалізації ЗТП. Враховуючи, що досягнення умов перемішування металу є термічно активованим процесом, для оцінки Q було використано відоме рівняння [14]:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) P^m, \quad (1)$$

де $\dot{\epsilon}$ — швидкість деформації; A — коефіцієнт пропорційності; R — універсальна газова постійна; T — температура (К); P — силова характеристика; m — показник ступеня.

За умов експерименту, співвідношення (1) було перетворено до вигляду:

$$Q = RT(m \ln P - \ln \omega), \quad (2)$$

де ω — частота обертання; P — сила притискання робочого інструмента.

Основу розрахунку Q склали експериментальні дані (рис. 4) різноманітних режимів зварювання.

Для товщини кромок 1,85 мм, підставляючи експериментальні значення для сталого режиму у співвідношення (2): $\omega = 13,3 \text{ с}^{-1}$ (800 хв⁻¹), $P = 1 \text{ кН}$; $\omega = 20,8 \text{ с}^{-1}$ (1250 хв⁻¹), $P = 0,59 \text{ кН}$ та $\omega = 26,7 \text{ с}^{-1}$ (1600 хв⁻¹), $P = 0,275 \text{ кН}$, для температур в зоні зварювання $0,7T_{пл}$, отримали відповідні значення Q . Характер залежності Q від ω наведено на рис. 5.

Наведені результати свідчать, що при підвищеній частоті обертання за умов сталої швидкості зварювання, нагрів до потрібної температури в зоні зварювання досягається меншим рівнем енергії.

Таким чином, зниження потрібної енергії може бути досягнуто зменшенням нормальної сили

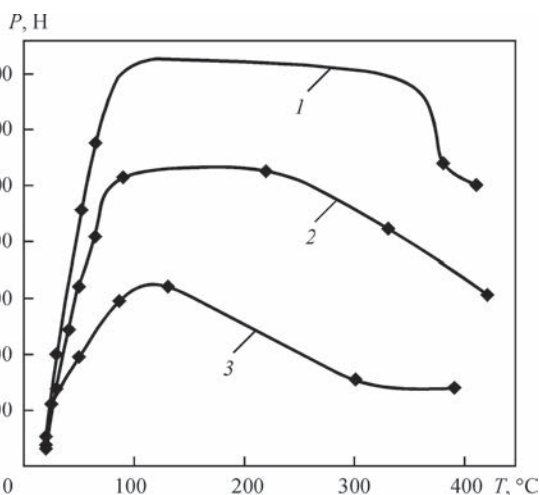


Рис. 4. Експериментальні криві впливу швидкості обертання ω і сили притискання P робочого інструмента ($v_{зв} = \text{const}$) на температуру розігріву кромок сплаву під заплечиком: 1 — $\omega = 800$; 2 — 1250; 3 — 1600 об/хв

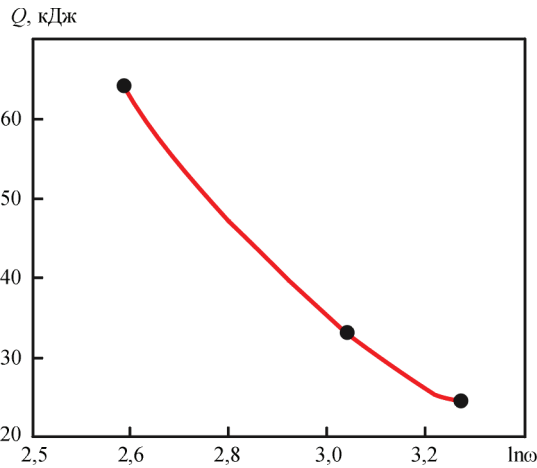


Рис. 5. Залежність величини енергії Q для усталеного процесу зварювання (при $0,7T_{пл}$) від частоти обертання робочого інструмента $\ln \omega$ і сили притискування при $v_{зв} = \text{const}$

притискування робочого інструмента до заготовок при збільшенні ω в процесі зварювання, що підтверджується на рис. 4 кривою 3.

Разом з цим за умов мінімальної сили P (0,275 кН) визначено інший характер зміни розрахованої за (2) кількості енергії від частоти обертання робочого інструмента (рис. 6).

Сумісний аналіз розрахованих значень Q (рис. 5, 6) свідчить про необхідність визначення оптимальної енергії для зварювання тертям з перемішуванням і можливої залежності від геометричних розмірів робочого інструмента. Враховуючи внесок запличика в енергетичний баланс при ЗТП, була зроблена спроба оцінити оптимальний діаметр запличика робочого інструмента для різних товщин з'єднуваних кромок. З цією метою було використано співвідношення залежності теплового балансу процесу зварювання тертям від основних технологічних параметрів [15]:

$$N = \frac{2}{3} \pi \mu r \omega R_{\text{інс}}^3, \quad (3)$$

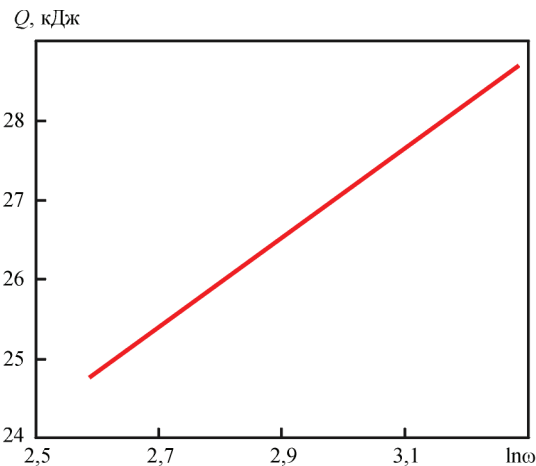


Рис. 6. Залежність кількості енергії Q для усталеного процесу зварювання від частоти обертання робочого інструмента ($\ln \omega$) при $P = 0,275$ кН, $v_{зв} = \text{const}$ за співвідношенням (2)

де N — енергетична характеристика; μ — коефіцієнт тертя; p — питомий нормальний тиск інструмента; ω — кутова швидкість обертання; $R_{\text{інс}}$ — радіус запличика інструмента.

Із співвідношення (3), $R_{\text{інс}}$ дорівнює:

$$R_{\text{інс}} = \sqrt[3]{\frac{3N}{2\pi\mu r \omega}}. \quad (4)$$

Результати розрахунку $R_{\text{інс}}$ за (4) з використанням гіпотетичних значень Q для досліджених інтервалів змін P і ω наведені на рис. 7.

З метою перевірки виконання залежності (4) були використані замість N оцінені величини Q з експерименту [16]. Отримані дані по $R_{\text{інс}}$ для умов експерименту при ЗТП для $\delta = 1,85$ мм свідчать про достатньо якісний збіг з розрахованими за (4).

Аналізи результатів експериментальних досліджень та проведених розрахунків підтверджують існуючу залежність величини теплової енергії в зоні зварювання, в першу чергу, від радіуса запличика робочого інструмента: зменшення $R_{\text{інс}}$ приводить до зниження Q .

В процесі зварювання розташування інструмента під кутом $1...3^\circ$ відносно нормалі до заготовки забезпечує необхідні умови для ущільнення металу. Очікувана нерівномірність розподілу температури по площині плями контакту (запличика) має місце лише на початкових етапах до виходу на оптимальні умови зварювання. Після цього досягаються стабільні умови процесу виділення теплової енергії.

При проектуванні робочого інструмента необхідно враховувати, що діаметр запличика не тільки визначає рівень механічних навантажень на обладнання в цілому, але й ширину зони розігріву. За умов підвищених частот обертання робочого інструмента надмірне збільшення $R_{\text{інс}}$ може призвести до перегріву зварного з'єднання, що буде мати негативний відбиток на його механіч-

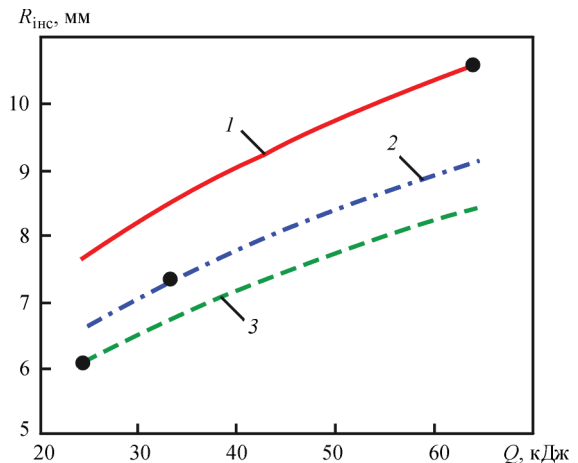


Рис. 7. Діаграма вибору радіуса запличика робочого інструмента $R_{\text{інс}}$ для усталеного режиму зварювання при $P = 0,275$ кН, $v_{зв} = \text{const}$ та $\delta = 1,85$ мм: 1 — $\omega = 800$; 2 — 1250; 3 — 1600 об/хв; ● — значення Q з аналізу рис. 5

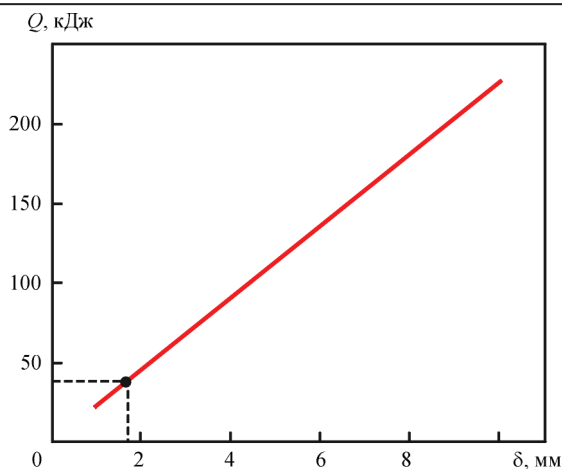


Рис. 8. Залежність потрібної кількості енергії Q за (5) для усталеного процесу зварювання від товщини металу δ

них властивостях. Отримані якісні залежності підтверджені експериментом: оптимальні умови зварювання скоріш досягаються при збільшенні ω і зниженні P .

Разом з цим слід очікувати визначеного впливу на технологічні характеристики при досягненні оптимального режиму зварювання з боку хімічного та фазового складу сплаву. Сумарний внесок можна оцінити через кореляційні співвідношення теплових фізичних властивостей.

За критерієм подібності ψ можна визначити необхідну енергію для зварювання в залежності від товщини пластини δ [17]:

$$\psi = \frac{N}{\lambda T \delta}, \quad (5)$$

де N — характеристика, подібна Q з (3); λ — теплопровідність; δ — товщина кромок металу; T — температура в зоні зварювання, К.

За співвідношенням (5) для конкретного сплаву за умов незмінних λ і T (оптимальна температура розігріву кромок при ЗТП) величина ψ змінюється в дуже малому діапазоні значень, що підтверджено даними [17] і експериментально в роботі. Враховуючи, що товщина металу, що зварюється, може змінюватися в широкому діапазоні, розрахунки $R_{\text{інс}}$ обмежили товщинами від 1 до 10 мм, що є найбільш поширеними в промисловості.

Після підстановки в (5) постійних характеристик λ , T і ψ (прийняли постійною величиною) отримали співвідношення між δ і Q для сталого режиму ЗТП (рис. 8). Враховуючи, що однакового рівня Q можна досягнути різною комбінацією ω і P , розрахунок енергії для зварювання за (5) в дійсності дає середнє значення для діапазону змін ω і P , що має визначене підтвердження. Так, для товщини $\delta = 1,85$ мм отримане значення енергії за співвідношенням (5) і середня величина Q за трьома режимами (40 кДж) мають достатньо якісний збіг.

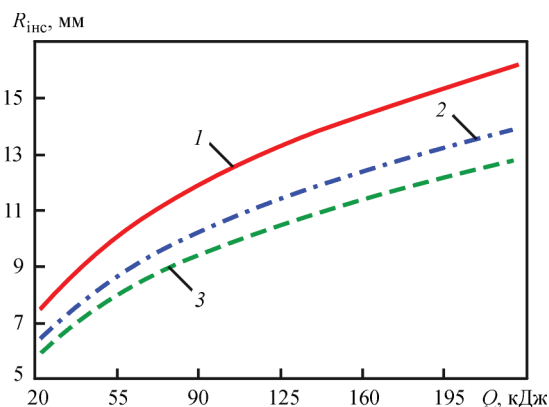


Рис. 9. Діаграма визначення рекомендованого радіуса заплечика робочого інструмента $R_{\text{інс}}$ для досягнення усталеного процесу зварювання при $P = 0,275$ кН, $v_{\text{зв}} = \text{const}$: 1 — $\omega = 800$; 2 — 1250; 3 — 1600 об/хв

Таким чином, наведена залежність (рис. 8) дозволяє визначити оптимальні умови ЗТП для пластин різної товщини. Наприклад, для $\delta = 3$ мм необхідна величина теплової енергії повинна складати значення порядку 70 кДж. Далі за цим значенням енергії для конкретного устаткування з визначеною потужністю оцінюють оптимальну частоту обертання робочого інструмента та відповідний радіус заплечика.

Враховуючи, що побудоване співвідношення $R_{\text{інс}} = f(Q)$ (рис. 7) стосується лише товщини кромок 1,85 мм, на рис. 9 наведено більш узагальнений приклад, коли $1 < \delta < 10$ мм.

Разом з цим, побудована діаграма (рис. 9) в дійсності відповідає умовам постійної сили притискання (0,275 кН), хоча оптимальний рівень Q для зварювання (ЗТП) визначається комбінацією ω і P .

Перевірку виконання залежності (рис. 9) було здійснено експериментально. Так, за умов постійної сили притискання (0,275 кН) для зварювання кромок товщиною 3 мм при $\omega = 1250$ об/хв радіус інструмента повинен знаходитись в інтервалі 9...10 мм, а для частоти 1600 об/хв — приблизно 8...9 мм.

За умов, коли обґрунтована необхідність пошуку оптимального режиму зварювання заснована на зміні сили притискання робочого інструмента, розрахунок $R_{\text{інс}}$ здійснюють за іншою діаграмою, для конкретного значення P .

Таким чином, за наведеними оцінками стає можливим удосконалити процес пошуку оптимальних умов зварювання за технологією тертя з перемішуванням.

Висновки

1. На прикладі сплаву на основі алюмінію визначено основні умови досягнення ефекту постійного пом'якшення при ЗТП металевих матеріалів.

2. Визначено мінімальне значення температурного інтервалу пом'якшення металу при ЗТП.

3. Для різних товщин з'єднуваних кромок розроблено методику вибору радіусу заплічка в залежності від співвідношення швидкості обертання та сили притискання робочого інструмента при ЗТП.

Список литературы

1. Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. et al. (1991) *Friction Stir Butt Welding*. Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203; GB Pat. Application № 9125978.8. Publ. 1991.
2. Shneider J. A. (2007) Temperature distribution and resulting metal flow. *Friction stir welding and processing*, 37–49.
3. Макаров Э. Л., Королев С. А., Штрикман М. М., Кашук Н. М. (2010) Моделирование тепловых процессов при фрикционной сварке. *Сварка и диагностика*, **3**, 21–25.
4. Mishara R. S., Mahoney M. W. (2007) *Friction stir welding and processing*. Ohio, ASM International.
5. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Подбельников С. В. (2008) Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм. *Автоматическая сварка*, **10**, 27–30.
6. Song M., Kovacevic R. (2003) Numerical and Experimental Study of the Heat Transfer Process in Friction Stir Welding. *Proc. Ins. Mech. Eng., B, J. Eng. Manuf.*, IMECHE, **1**, 73–85.
7. Вакуленко І. О., Митяєв О. А., Плітченко С. О. (2014) Про структурні перетворення при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. Запоріжжя, **1**, сс. 8–10.
8. Schneider J. A., Nunes A. C. (2004) Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. *Metall. mater. trans.*, **B, 3**, 777–783.
9. Colligan K. (2003) *Tapered Friction Stir Welding Tool*. Int. Pat. Application 10/140,797; US, Pat. 6,669,075 B2.
10. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Наєждін Ю. Л. (2012) Використання технології зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, **41**, 230–233.
11. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Наєждін Ю. Л. (2012) *Спосіб зварювання тертям з перемішуванням сплавів на основі алюмінію*. Україна, Пат. 75698, МПК В23К 1/00; заявник і патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. U201206529.
12. Reynolds A. P., Shneider A. P. (2007) Microstructure development in aluminum alloy friction stir welds. *Friction stir welding and processing*, 51–70.
13. Вакуленко І. А., Большаков В. И. (2008) *Морфология структуры и деформационное упрочнение стали*. Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет.
14. Hayes R. W., Hayes W. C. (1982) On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy. *Acta Metallurgica*, **30**, 1295–1301.
15. Виль В. И. (1970) *Сварка металлов трением*. Ленинград, Машиностроение.
16. Vakulenko I. O., Plitchenko S. O. (2017) Determination activation energy of friction stir welding. *Welding and related technologies (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, pp. 54–58.
17. Ерохин А. А. (1973) *Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности*. Москва, Машиностроение.

References

1. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.S. et al. (1991) *Friction stir butt welding*. Int. Pat. Appl. PCT/GB 92/02203; GB Pat. Appl. 9125978.8. Publ. 1991.
2. Schneider, J.A. (2007) Temperature distribution and resulting metal flow: *Friction stir welding and processing*, 37–49.

3. Makarov, E.L., Korolyov, S.A., Shtrickman, M.M., Kashchuk, N.M. (2010) Modeling of thermal processes in friction welding. *Svarka i Diagnostika*, **3**, 21–25 [in Russian].
4. Mishara, R.S., Mahoney, M.W. (2007) *Friction stir welding and processing*. Ohio, ASM International.
5. Poklyatsky, A.G., Ishchenko, A. Ya., Podielnikov, S.V. (2008) Influence of friction stir welding process parameters on weld formation in welded joints of aluminium alloys 1.8–2.5 mm thick. *The Paton Welding J.*, **10**, 22–25.
6. Song, M., Kovacevic, R. (2003) Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding. In: *Proc. Ins. Mech. Eng., B.J. Eng. Manuf.*, IMECHE, **1**, 73–85.
7. Vakulenko, I.O., Mityaev, O.A., Plitchenko, S.O. (2014) On structure transformations in friction stir welding of aluminium alloy. In: *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. Zaporizhzhya, **1**, 8–10 [in Ukrainian].
8. Schneider, J.A., Nunes, A.C. (2004) Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. *Metall. Mater. Trans.*, **B, 3**, 777–783.
9. Colligan, K. (2003) *Tapered friction stir welding tool*. Int. Pat. Appl. 10/140,797; US Pat. 6,669,075 B2. Publ. 30.12.2003.
10. Vakulenko, I.O., Plitchenko, S.O., Nadezhdin, Yu.L. (2012) Application of friction stir welding technology of aluminium alloy. *Visnyk Dniprop. Nats. Zalizn. Transport. Univers. V. Lazaryana*, **41**, 230–233 [in Ukrainian].
11. Vakulenko, I.O., Plitchenko, S.O., Nadezhdin, Yu.L. (2012) *Method of friction stir welding of aluminium-based alloys*. Ukraine Pat. 75698, Int. Cl. B23K 1/00. Fill. 29.05.12; Publ. 10.12.12 [in Ukrainian].
12. Reynolds, A.P., Schneider, A.P. (2007) Microstructure development in aluminum alloy friction stir welds. In: *Friction stir welding and processing*, 51–70.
13. Vakulenko, I.A., Bolshakov, V.I. (2008) *Morphology of structure and strain hardening of steel*: Monography. Dnepropetrovsk, DNU [in Russian].
14. Hayes, R.W., Hayes, W.C. (1982) On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy. *Acta Metallurgica*, **30**, 1295–1301.
15. Vill, V.I. (1970) *Friction welding of metals*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
16. Vakulenko, I.O., Plitchenko, S.O. (2017) Determination activation energy of friction stir welding. In: *Proc. of 9th Intern. Conf. of Young Scientists on Welding and Related Technologies (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, 54–58.
17. Erokhin, A.A. (1973) *Fundamentals of fusion welding. Physical-chemical principles*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

И. А. Вакуленко, С. А. Плитченко

Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени
академика В. Лазаряна. 49010, г. Днепр, ул. Лазаряна, 2.
E-mail: plit4enko@ukr.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

На примере алюминиевого сплава предлагается методика определения параметров процесса соединения пластин по технологии сварки трением с перемешиванием. В процессе исследований при различных соотношениях частоты вращения рабочего инструмента и нормального прижима к соединяемым крокам определен характер разогрева металла. Из анализа характера повышения температуры разогрева соединяемых кромок определено минимальное значение температурного интервала при реализации технологии сварки трением с перемешиванием. По анализу полученных экспе-

риментальных данных предлагается концепция определения основных параметров процесса сварки. Библиогр. 17, рис. 9.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; тепловая энергия; рабочий инструмент; режимы сварки; сплавы на основе алюминия; оптимальная температура

I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan. 2 Lazarayn Str.,
Dnipro, 49010. E-mail: plit4enko@ukr.net

DETERMINATION OF PARAMETERS OF FRICTION
STIR WELDING MODE OF ALUMINUM-BASED ALLOY

A procedure is proposed for determination of parameters of process of plates joining using friction stir welding technology by the example aluminum alloy. A nature of metal heating was determined in the process of investigation of working tool rotation at different relationships of frequencies and normal pressing to joined edges. A minimum value of temperature interval in realizing of friction stir welding technology was determined from the analysis of nature of increase of heating temperature of edges being joined. Based on the analysis of received experimental data a concept of determination of main parameters of welding process was proposed. 17 Ref., 9 Fig.

Keywords: friction stir welding, heat energy, working tool; welding mode, aluminum-based alloys, optimum temperature

Поступила в редакцию 23.02.2018

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

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

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



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

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

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте:

<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Математическое моделирование:

- процессов переноса энергии, импульса, массы и заряда в сварочных дугах;
- тепловых, электромагнитных, гидродинамических и массообменных процессов;
- напряженно-деформированного состояния сварных конструкций;
- кинетики твердофазных превращений в зоне термического влияния;
- кристаллизации металла сварного шва и образования химической неоднородности;
- формирования сварного шва, нагрева, плавления и переноса электродного металла;
- взаимодействия высококонцентрированных источников энергии со свариваемым металлом;
- идентификации дефектов при неразрушающих методах контроля сварных соединений.

Информационные технологии в сварке и родственных процессах

Контрольные даты

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

Оргкомитет

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,
ул. Казимира Малевича 11,
г. Киев, 03680, Украина;
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua

<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ 10ХСНДА И 15ХСНДА В МОНТАЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Д. П. ЧЕПРАСОВ¹, Ю. А. КУЗНЕЦОВ², Е. А. ЛЕДНИКОВ³

¹АлтГТУ им. И. И. Ползунова. 656038, Россия, г. Барнаул, просп. Ленина, 46. E-mail: ar_gac@mail.ru

²АФ ОАО «Сибмост», Мостоотряд-96. 656011, Россия, г. Барнаул, просп. Ленина, 119а

³ООО «ГАЦ АР НАКС». 656000, Россия, г. Барнаул, Красноармейский просп. 71

Представлены результаты оптимизации технологии автоматической сварки под флюсом, выполняемой на монтаже при сооружении мостовых переходов из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА (ТУ 14-1-5120-2008) в условиях Западно-Сибирского региона. С учетом местных климатических и температурных условий, назначения металлоконструкций, принципа легирования сталей и толщины свариваемых листов установлено, что сварку необходимо выполнять на режимах, обеспечивающих погонную энергию в пределах 30...35 тыс. Дж/см в два прохода, на стеклянной подложке с уменьшенной на 20...30 % высотой засыпки металлохимической присадки. Обеспечение требуемых вязкости и прочности сварных соединений по этой технологии объясняется благоприятными условиями для фазовых превращений и образования однородной структуры в металле шва и ЗТВ. Библиогр. 9, табл. 4, рис. 3.

Ключевые слова: мостовые конструкции, автоматическая сварка под флюсом, погонная энергия, зона сплавления, охрупчивание

В качестве основного материала для изготовления мостовых конструкций Северного исполнения согласно [1] применяют стали марки 10ХСНД, 15ХСНД (ГОСТ 6713-91) и стали марок 10ХСНДА и 15ХСНДА (ТУ 14-1-5120-2008). Основным отличием сталей, выпускаемых по ТУ от стандартных, является наличие в их составе сильных карбидообразующих элементов и несколько пониженное содержание углерода, марганца, хрома, никеля и вредных примесей (табл. 1, 2).

Первый опыт применения этих марок сталей, выпускаемых еще по ТУ 14-1-5120-91, показал [2, 3], что стыковые сварные соединения толщиной 12...16 мм, полученные односторонней одно- и двухпроходной сваркой под флюсом с применением металлохимической присадки (МХП) и медных формирующих подкладок, склонны к низкотемпературному охрупчиванию, особенно по зоне сплавления.

В новых ТУ [4] химический состав скорректирован в сторону уменьшения углеродного эквивалента. Однако устранить повышенную чувствительность монтажных сварных соединений

к низкотемпературному охрупчиванию, при однопроходной автоматической сварке под флюсом не удалось [5]. Поэтому настоящая работа посвящена оптимизации технологии автоматической сварки под флюсом необходимой для сооружения мостовых переходов из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА (ТУ 14-1-5210-2008) в температурных условиях региона.

Материалы и методика выполнения исследований. Согласно требованию проектно-технической документации для строительства мостов Северного исполнения в работе применялся листовой прокат категорий 2 и 3 в нормализованном или в термически улучшенном состоянии после закалки и высокого отпуска с величиной углеродного эквивалента не более 0,45 %, определяемого по формуле [4].

В условиях Мостоотряда-96 в разные времена года сваривали длинномерные продольные и поперечные стыки настила ортотропных и консольных плит толщиной 12 мм без разделки кромок с применением МХП на медных и стеклянных подкладках. Для сварки использовали флюс АН-47

Таблица 1. Химический состав, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb
10ХСНД	< 0,12	0,8...1,1	0,5...0,8	0,6...0,9	0,5...0,8	0,4...0,6	—
15ХСНД	0,12...0,18	0,4...0,7	0,4...0,7	0,6...0,9	0,3...0,6	0,2...0,4	—
10ХСНДА	< 0,12	0,8...1,1	0,65...0,95	0,3...0,6	0,2...0,5	0,4...0,6	0,03...0,06
15ХСНДА	0,1...0,15	0,4...0,7	0,6...0,9	0,3...0,6	0,2...0,5	0,2...0,4	0,03...0,06

Примечание. В сталях 10ХСНД и 15ХСНД серы и фосфора не более 0,035 мас. %. В сталях 10ХСНДА и 15ХСНДА – серы не более 0,010 мас. %, фосфора – 0,015 мас. %. Допускается замена ниобия ванадием в количестве 0,08...0,12 мас. %.

Таблица 2. Механические свойства сталей

Марка стали	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_s , %	Ударная вязкость KCU , Дж/см ² для проката категорий при температуре, °С		
				1	2	3
				–40	–60	–70
10ХСНД	530...670	390	19	29	29	29
15ХСНД	490...670	335...345	19...21	29	29	29
10ХСНДА	510...670	390...495	19	29	29	29
15ХСНДА	470...685	335...450	19...21	29	29	29

в сочетании с проволокой Св-10НМА диаметром 4 мм на режимах, необходимых для практических целей.

В процессе выполнения сварочных работ систематически осуществлялся контроль качества сварных соединений разрушающими и неразрушающими методами по выявлению наружных и внутренних дефектов и по определению механических свойств. Для изготовления образцов использовали выводные планки, применяемые при сварке монтажных стыковых соединений, либо технологические пробы, применяемые для отработки режимов сварки. В ряде случаев для уточнения полученных данных образцы изготавливались непосредственно из штатных сварных соединений.

Статическому растяжению на разрывной гидравлической машине Р-100 подвергали образцы типа XIII по ГОСТ 6996-66. Ударную вязкость определяли на образцах типа VI по ГОСТ 6996-66. Структуру металла сварного шва и околошовной зоны (ОШЗ) изучали с помощью оптического микроскопа Neophot 32 при увеличении до 500. Фазовый состав, тонкую структуру, качественный и количественный анализ морфологических и структурных составляющих продуктов распада аустенита в металле ОШЗ и зоны сплавления изучали с помощью рентгеновских съемок на дифрактометре ДРОН-2,0, просвечи-

вающей электронной микроскопии с использованием дифракционного свето- и темнопольного изображения.

Результаты исследований и их обсуждение. Установлено, что сварные соединения ортотропных плит из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА, выполненные односторонней одно- и двухпроходной автоматической сваркой под флюсом проволокой с МХП на медных формирующих подкладках обладают необходимыми прочностными и пластическими свойствами, которые находятся на уровне свойств основного металла (рис. 1). Вместе с тем данные сварные соединения, полученные односторонней сваркой под флюсом как в летних, так и в зимних условиях на погонных энергиях свыше 50 тыс. Дж/см, оказались чувствительными к низкотемпературному охрупчиванию, особенно по зоне сплавления. В большей степени охрупчивание при –60 °С наблюдалось при сварке в зимних условиях при температуре окружающей среды –15...–20 °С, с применением медных формирующих подкладок (табл. 3, вар. 1, 3). Применение многопроходной автоматической сварки под флюсом на пониженных погонных энергиях с использованием стальных подкладок со вставленными полосками из листового стекла по ГОСТ 111-2014 толщиной 4...5 мм, обеспечивает формирование качественных сварных соединений при сварке как в летних, так и в зимних условиях (табл. 3, вар. 2, 4).

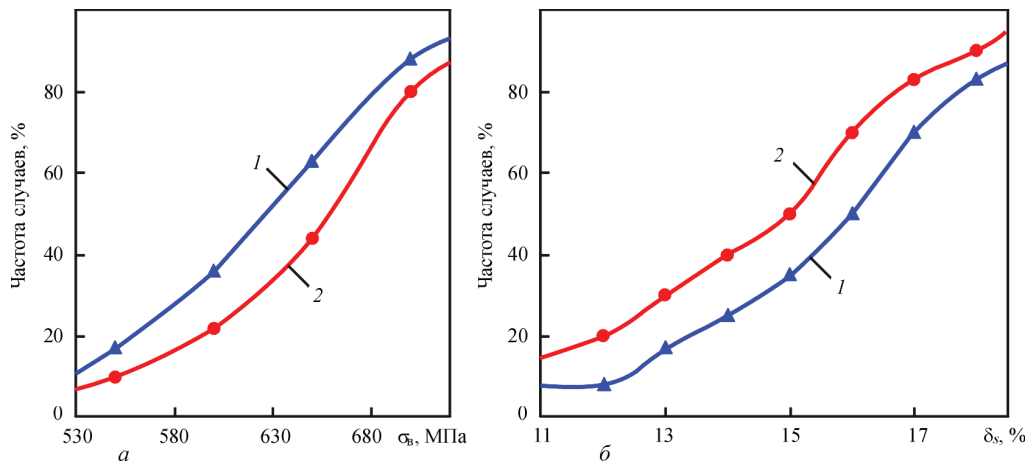


Рис. 1. Частотные кривые распределения временного сопротивления на разрыв (а) и относительного удлинения (б) сварных соединений из сталей 10ХСНДА (1) и 15ХСНДА (2)

Таблица 3. Ударная вязкость металла одно- и двухпроходных стыковых сварных соединений сталей

Номер варианта	Марка стали сварного соединения	Толщина стенки стыкового соединения, мм	Количество проходов	Среднее значение погонной энергии сварки прохода, Дж/см	Среднее значение времени пребывания металла при температуре выше 1300 °С, с	Ударная вязкость KCU при -60 °С, Дж/см ²		
						Основной металл	Металл шва	Зона сплавления
1	15ХСНДА	12	1	63 000	56,0	90...110	35...50	15...25
2	15ХСНДА	12	2	$\frac{45\,000}{40\,000}$	$\frac{28,5}{24,0}$	90...110	55...70	40...50
3	10ХСНДА	12	1	63 500	57,0	80...100	35...40	10...15
4	10ХСНДА	12	2	$\frac{44\,000}{40\,000}$	$\frac{28,0}{24,0}$	80...100	50...60	35...45

Примечание. В числителе погонная энергия и время пребывания металла первого прохода, в знаменателе – второго.

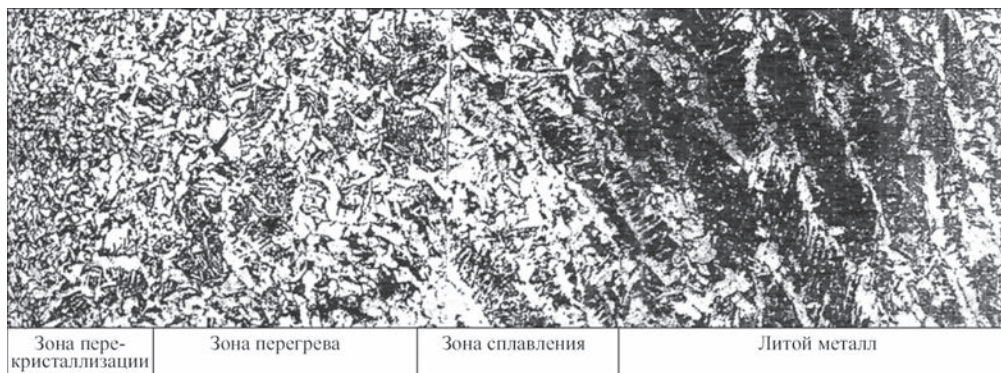


Рис. 2. Микроструктура ($\times 250$) сварного шва из стали 15ХСНДА, выполненного односторонней однопроходной автоматической сваркой под флюсом на повышенных погонных энергиях (табл. 3, вар. 1)

Опыт показывает, что сварка на повышенных погонных энергиях на медных подкладках приводит к кипению расплавленного металла с последующими его выплесками через флюсовую корку, появлению пор, наплывов и других дефектов сварного шва.

Исследованиями структуры образцов, вырезанных непосредственно из штатных стыковых соединений, установлено, что при автоматической сварке под флюсом данных сталей на повышенных погонных энергиях (табл. 3, вар. 1, 3) в ОШЗ формируется крупное зерно с наличием тонких пластинок α -фазы, пронизывающих зерна с продуктами промежуточного распада аустенита, что свидетельствует о наличии сильного перегрева, приведшего к формированию неблагоприятной видманштеттовой структуры (рис. 2).

В зоне сплавления период решетки α -фазы больше, чем у феррита, входящего в структуру основного металла. Скалярная плотность дефектов

кристаллического строения находится на уровне скалярной плотности дефектов кристаллического строения мартенситной α -фазы, формирующейся при распаде аустенита в области мартенситного превращения (табл. 4). В стыках, внутри зерна и на границах ферритных кристаллов присутствуют как крупные, так и мелкие карбиды, преимущественно пластинчатой формы (рис. 3). Амплитуда кривизны кручения кристаллической решетки достигает $950...1000\text{ см}^{-1}$ и по своему значению приближается к максимальной величине, отмечаемой в мартенситной α -фазе (табл. 4).

Установлено, что при многослойной сварке на пониженных погонных энергиях (табл. 3, вар. 2, 4), с применением стеклянной подкладки, видманштеттовая структура отсутствовала. В ОШЗ формировалась ферритно-перлитная структура с величиной зерна номерами 6, 5 по ГОСТ 5640-68. Ферритная α -фаза имеет значительно меньший период своей кристаллической решетки по сравнению с α -фа-

Таблица 4. Физические характеристики α -фазы

Наименование	Период кристаллической решетки, нм	Скалярная плотность дислокаций ρ , 10^9 см^{-2}	Амплитуда кривизны кручения кристаллической решетки, см^{-1}
Табличное значение для α -фазы Fe [6]	0,28664	—	—
Сталь 15ХСНДА в нормализованном состоянии	0,28720	1,55...2,15	450...550
Мартенситная α -фаза	0,28860	6,40...7,60	1350...1400
Сварное соединение (зона сплавления). Табл. 3, вар. 1	0,28770	5,60...6,70	950...1000
Сварное соединение (зона сплавления). Табл. 3, вар. 2	0,28735	2,10...3,20	560...640

Примечание. Точность определения периода решетки $\pm 0,00005\text{ нм}$, скалярной плотности дислокаций $\pm 0,2 \cdot 10^9\text{ см}^{-2}$, кривизны кручения кристаллической решетки 50 см^{-1} .

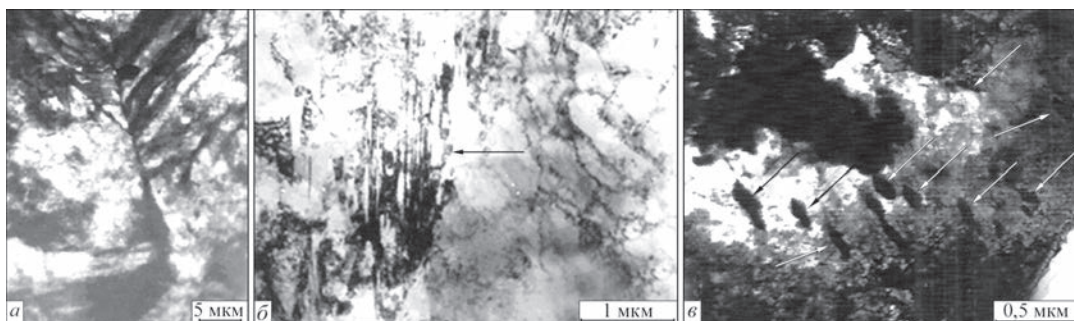


Рис. 3. Тонкая структура в локальных участках зоны сплавления сварного соединения из стали 15XCHDA: *а* — фрагмент линии сплавления; *б* — скопление карбидов пластинчатой формы; *в* — пластины α -фазы с однонаправленными карбидными частицами (отмечены стрелками)

зой, формирующейся при сварке на повышенных погонных энергиях (табл. 4). Скалярная плотность дефектов кристаллического строения находится в пределах скалярной плотности дефектов кристаллического строения в доэвтектоидном феррите основного металла проката категории 2, поставляемого после нормализации. В поле кристаллов и по границам α -фазы наличие карбидов не просматривалось.

Дополнительным подтверждением полученных при электронной микроскопии данных о наличии в зоне сплавления карбидных и карбонитридных включений могут служить результаты микрохимического анализа, выполненного на установке «МАР-1» (микроанализатор рентгеновский) по методике, изложенной в работе [6]. Установлено, что на образцах, полученных при односторонней однопроводной автоматической сварке под флюсом на повышенных погонных энергиях, при прохождении электронного пучка по зоне сплавления четко фиксировались фосфоресцирующие вспышки при попадании в электронный пучок карбидных и карбонитридных включений ниобия, ванадия и других карбидообразующих элементов, входящих в состав сталей 10XCHDA и 15XCHDA. При микрохимическом анализе образцов, сваренных многослойной сваркой на пониженных погонных энергиях, количество фосфоресцирующих вспышек при попадании в электронный пучок карбидных и карбонитридных включений, резко уменьшалось. Их количество в зоне сплавления не превышало аналогичных показателей в основном металле.

Полученные данные, а также данные, ранее изложенные в работе [2] позволяют заключить, что сварка на повышенных (свыше 50 тыс. Дж/см) погонных энергиях сталей 10XCHDA и 15XCHDA, микролегированных сильными карбидообразующими элементами, приводит к длительному пребыванию металла шва и ОШЗ в области высоких (свыше 1300 °С) температур. Это обуславливает более полное растворение в жидкой фазе и аустените карбидов и карбонитридов, рост зерна аустенита. Последующее охлаждение вызывает формирование неблагоприятной видманштеттовой

структуры, выпадение из аустенита и расплава карбонитридов ванадия, ниобия и хрома, которые по мнению [7, 8] способствуют локальному искажению кристаллической решетки α -фазы, снижению подвижности дислокаций, особенно при отрицательных температурах и, как следствие, затруднению процесса скольжения при деформации.

Таким образом, основной причиной низкой сопротивляемости ударным нагрузкам при отрицательных температурах сварных соединений мостовых конструкций из сталей 10XCHDA и 15XCHDA, полученных односторонней автоматической сваркой под флюсом сплошной проволокой с гранулированной присадкой на повышенных (свыше 50 тыс. Дж/см) погонных энергиях с применением медных формирующих подкладок, следует считать сформировавшуюся в зоне сплавления крайне неоднородную структуру, состоящую из дислоцированного феррита, насыщенного карбидными и карбонитридными включениями, которые служат своеобразными концентраторами напряжений, обуславливая хрупкость соединения. Целесообразности применения стеклянной подложки при автоматической сварке под флюсом стальных мостовых конструкций придерживаются авторы работы [9].

В заключение можно отметить, что настоящие результаты и более ранний опыт выполнения сварочных работ в экстремальных климатических условиях Западной Сибири требуют оптимизации промышленной технологии автоматической сварки под флюсом на монтаже. Она сводится к выполнению сварки в два прохода на пониженных погонных энергиях и применению стеклянных подложек. При этом, как правило, первый проход следует выполнять на погонных энергиях 30...35 тыс. Дж/см с уменьшенной на 20...30 % высотой засыпки крупки, что обеспечивает гарантированный провар корня шва. Второй проход, при толщине свариваемых кромок 12...14 мм, формирует более «аккуратный» по высоте сварочный шов, так как первый проход не заполняет весь объем зазора. При сварке на стеклянных подложках уменьшается скорость охлаждения сварного

соединения в районе температур фазовых превращений, что предотвращает образование промежуточных (бейнитных) и закалочных структур. При выполнении сварочных работ в осенне-зимних условиях следует особо контролировать температуру подогрева и сварку выполнять на предварительно подогретых стальных подкладках, в пазы которых вставлены стеклянные полосы толщиной 4...5 мм. С учетом местных климатических условий, особенностей конструкции мостового перехода, для получения качественных сварных соединений, на каждом новом объекте, необходимо тщательно отрабатывать технологию автоматической сварки под флюсом, применяя для этих целей металл так называемых технологических проб, поставляемых на строительную площадку вместе с металлоконструкциями.

Список литературы

1. СТО-ГК «Трансстрой»-005-2007. Стандарт организации. *Стальные конструкции мостов. Технология монтажной сварки.*
2. Чепрасов Д. П., Иванайский Е. А., Платонов А. С. и др. (1998) Свойства монтажных сварных соединений мостовых конструкций из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА. *Сварочное производство*, **6**, 16–18.
3. Чепрасов Д. П., Петров В. П., Иванайский Е. А. и др. (2003) Водородная хрупкость монтажных сварных соединений мостовых конструкций из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА. *Там же*, **3**, 12–16.
4. ТУ 14-1-5120-2008 *Прокат толстолистовой из низколегированной стали высокого качества для мостостроения.*
5. Ледников Е. А., Чепрасов Д. П., Конник Д. А. (2017) Хладостойкость сварных соединений стальных мостовых конструкций из высококачественных сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА. *Ползуновский альманах*, **1**, 84–90.
6. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. (1970) *Рентгенографический и электроннооптический анализ. Практическое руководство по рентгенографии, электроннографии и электронной микроскопии металлов, полупроводников и диэлектриков.* Москва, Металлургия.
7. Добротина З. А., Литвиненко С. П., Розанова Г. А. (1979) Хладостойкость сварных соединений стали 09Г2СБФ. *Сварочное производство*, **1**, 25–27.
8. Брайент К. Л., Бенерджен С. К. (ред-ы) (1988) *Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов.* Пер. с англ. Москва, Металлургия.
9. Музалев В. Н., Семухин Б. С. (2015) Особенности сварки металлических пролетных строений мостов. *Вестник ТГАСУ*, **2**, 184–193.

References

1. STO-GK Transstroy-005-2007: Standard of organization. *Steel bridge structures. Technology of field welding* [in Russian].
2. Cheprasov, D.P., Ivanajsky E.A., Platonov, A.S. et al. (1998) Properties of field welded joints of bridge structures from steels 10KhSNDА and 15KhSNDА. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 16-18 [in Russian].
3. Cheprasov, D.P., Petrov, V.P., Ivanajsky E.A. et al. (2003) Hydrogen brittleness of field welded joints of bridge structures from steels 10KhSNDА and 15KhSNDА. *Ibid.*, **3**, 12-16 [in Russian].
4. TU 14-1-5120-2008: *Rolled plate from high-quality low-alloy steel for bridge engineering* [in Russian].
5. Lednikov, E.A., Cheprasov, D.P., Konnik, D.A. (2017) Cold resistance of welded joints of steel bridge structures

from high-quality steels 10KhSNDА and 15KhSNDА. *Polzunovskiy Almanakh*, **1**, Izd-vo AltGTU [in Russian].

6. Gorelik, S.S., Rastorguev, L.N., Skakov, Yu.A. (1970) X-ray and electro-optical analysis. *Practical guide on radiography, electronography and electron microscopy of metals, semiconductors and dielectrics.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Dobrotina, Z.A., Litvinenko, S.P., Rozanova, G.A. (1979) Cold resistance of welded joints of 09G2SBF steel. *Svarochn. Proizvodstvo*, **1**, 25-27 [in Russian].
8. (1988) *Embrittlement of structural steels and alloys.* Ed. by K.L. Bryant et al. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Muzalev, V.N., Semukhin, B.S. (2015) Peculiarities of welding of metal bridge spans. *Vestnik TGASU*, **2**, 184-193 [in Russian].

Д. П. Чепрасов¹, Ю. А. Кузнецов², С. О. Ледников³

¹АлтДТУ ім. І. І. Ползунова.

656038, Росія, м. Барнаул, просп. Леніна, 46.

E-mail: ar_gac@mail.ru

²АФ БАТ «Сибмост», Мостозагін-96.

656011, Росія, м. Барнаул, просп. Леніна, 119а

³ТОВ «ГАЦ АР НАКЗ».

656000, Росія, м. Барнаул, Червоноармійський просп. 71

АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ ПРОГІННИХ БУДОВ МОСТІВ З ВИСОКОЯКІСНИХ СТАЛЕЙ 10ХСНДА і 15ХСНДА В МОНТАЖНИХ УМОВАХ

Представлено результати оптимізації технології автоматичного зварювання під флюсом, яке виконується на монтажі при спорудженні мостових переходів із сталей 10ХСНДА та 15ХСНДА (ТУ 14-1-5120-2008) в умовах Західно-Сибірського регіону. З урахуванням місцевих кліматичних і температурних умов, призначення металлоконструкцій, принципу легування сталей і товщини зварювальних листів встановлено, що зварювання необхідно виконувати на режимах, що забезпечують погонну енергію в межах 30...35 тис. Дж/см в два проходи, на скляній підкладці зі зменшеною на 20...30 % висотою засипки механохімічної присадки. Забезпечення необхідних в'язкості і міцності зварних з'єднань за цією технологією пояснюється сприятливими умовами для фазових перетворень і утворення однорідної структури в металі шва і ЗТВ. Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: мостові конструкції, автоматичне зварювання під флюсом, погонна енергія, зона сплавлення, окрихнення

D. P. Cheprasov¹, Y. A. Kuznetsov², E. A. Lednikov³

¹Polzunov Altai State Technical University.

46 Lenina Ave., Barnaul, Russia, 656038.

E-mail: ar_gac@mail.ru

²«SIBMOST OJSC», Mostootryad-96.

119a Lenina Ave., Barnaul, Russia, 656011

³«GATs AR NAKS» LLC. 71 Krasnoarmeyskii Ave., Barnaul, Russia, 656000

AUTOMATIC SUBMERGED ARC WELDING OF BRIDGE SPANS OF HIGH-QUALITY STEELS 10KhSNDА and 15KhSNDА IN FIELD

Presented are the results of optimization of technology of submerged arc welding performed in assembly at construction

6 b idg sp a 6 steels 10K5 NDA ad 15K5 NDA (TU 14-1-5120-2008) d r c d t i a 6 West-Sib rian reg n Tak ng in o accn lo al climatic ad temp ratn e c d t i a , d sig atin 6 metal stru tn es, p i a i p e 6 steel all i g ad th ck ss 6 weld d sh ets it is d termia d th t weld g sh ll b carried o a ig th md s prov i d g b at ip in th limits 6 30-35 th J/cm in two p sses, n g ass sh trate with red ed b 20-30% height of fill of metal-chemical filler. Necessary toughness and

stre g h 6 weld d j o n s n th s tech g is e p aia d b fa a b e c d t i a f o p se tra s f o mat i a ad f o mat i a 6 th g a s stru tn e in weld metal ad HAZ. 9 Ref., 4 Tab ., 3 Fig

Keywo ds: b idg stru tn es, att m atic sh erg d arc weld g b at ip , f s i a a , e mb ittle men

Поступила в редакцию 15.02.2018

Правила для авторов журнала «Автоматическая сварка»

www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as

Международный научно-технический и производственный журнал «Автоматическая сварка» издается Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАНУ ежемесячно с 1948 г. на русском языке, ISSN 0005-111X, подписной индекс 70031, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Полный перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка» издается в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ под названием «The Paton Welding Journal» с 2000 г., ISSN 0957-798X, подписной индекс 21971, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407tpwj>.

В журнале «Автоматическая сварка» публикуются оригинальные статьи и обзоры по всем направлениям развития сварки, наплавки, резки, пайки, нанесения покрытий и других родственных технологий. Все рукописи рецензируются. Публикация статей в журнале бесплатная, гонорар не выплачивается. Редакционная коллегия журнала руководствуется в своей работе международными этическими нормами научных публикаций и придерживается политики открытого доступа.

Основные требования

1. Стандартный объем статьи 8-10 страниц текста, включая реферат, ключевые слова, таблицы, до 6-8 рисунков, библиографический список (объем обзорной статьи может быть увеличен до 12-14 страниц). Текст печатается через 1,5 интервала шрифтом Times New Roman, 12 кегль. Для набора формул используется только встроенный в Microsoft Word редактор формул Math Type 6.8 (формулы нельзя вставлять как сканированный рисунок или как импортированный объект из другого редактора; просьба НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ встроенный в Microsoft Word редактор формул). Название статьи, сведения об авторах (ФИО, адрес организации, электронный адрес и телефон), реферат и ключевые слова подавать на русском, украинском и английском языках. Рисунки не следует перегружать второстепенными данными. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ. Сведения об авторах должны также включать их библиометрический профиль ORCID (ResearcherID).

Публикацию статьи ускорит представление ее в электронном виде по электронной почте в формате Word. Иллюстрации представляются в отдельных файлах в формате*.tif (300 dpi) для растровой и *.cdr (600 dpi) для векторной графики.

2. В статье должно быть не более 5 авторов (других, принимавших участие в работе, можно указать в сноске).

3. Объем реферата должен составлять около 1000 знаков (12 строк) с одним пробелом между словами. В нем должны быть отражены цель, методики и основные результаты, но не в форме выводов. Реферат не должен содержать формул и греческих букв. Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний.

4. Каждая рукопись должна быть снабжена библиографическим списком, включающим 8 (min)-20 (max) ссылок; собственные работы авторов могут составлять не более четверти списка, ссылки на источники до 2000 г. желательно минимизировать. Цитируемая в статье литература должна быть оформлена в соответствии с Гарвардским стилем (см. предыдущие выпуски журнала, начиная с №№ 5-6 за 2017 г.).

5. Рукопись статьи должна быть подписана всеми авторами (или одним автором от имени авторского коллектива). К рукописи прилагается лицензионный договор по передаче авторских прав редакции журнала на публикацию статьи, форма договора находится на сайте: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/license.

6. Несоответствие материалов статьи указанным требованиям (пп. 1-5) может служить поводом для отказа в публикации.

7. Авторы могут получить статьи из журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal» по электронной почте в формате *.pdf (по запросу).

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ СПИРАЛЕЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС*

Н. М. МАХЛИН¹, В. Е. ВОДОЛАЗСКИЙ¹, В. Е. ПОПОВ¹, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ², С. И. ЛАВРОВ³

¹ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³ОП «Атомэнергомаш» ГП «НАЭК «Энергоатом». 71503, г. Энергодар, Запорожской обл., а/я 306.

E-mail: lavrov@aem.zp.ua

Подогреватели высокого давления — принципиально необходимые звенья второго контура энергоблоков атомных электростанций с легководными реакторами типа ВВЭР. Они представляют собой одноплоскостные или двухплоскостные трубные спирали из углеродистой стали. В работе приведены результаты выбора и отработки технологии механизированной сварки для использования при изготовлении и восстановительном ремонте подогревателей высокого давления. Библиогр. 20, рис. 2.

Ключевые слова: подогреватели высокого давления, спирали подогревателей высокого давления, автоматическая сварка, плавящийся электрод, электродная проволока, смесь защитных газов, технологическое оборудование, поворотные стыки трубопроводов, сварочный вращатель

Наибольшее применение в мировой ядерной энергетике получили легководные реакторы на тепловых нейтронах (типа PWR и BWR), в которых в качестве и теплоносителя, и замедлителя используется вода. На долю энергоблоков с такими реакторами приходится не менее 87 % энергоблоков атомных электростанций (АЭС) всего мира [1, 2].

Подогреватели высокого давления (ПВД), являющиеся важнейшими и ответственными составляющими второго контура реакторов с водой под давлением (PWR), предназначены для подогревания питательной воды до требуемой температуры с последующей ее подачей на теплообменник — парогенератор (ПГ). Образующийся в ПГ пар поступает в турбину, приводящую в действие электрогенераторы энергоблока АЭС [1–3].

К реакторам типа PWR относятся и корпусные водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), эксплуатируемые на всех 15-ти энергоблоках четырех действующих АЭС Украины. Такие же реакторы предполагается использовать и в будущем при создании новых энергоблоков украинских АЭС.

Характерные особенности спиралей ПВД заключаются в наличии сварных соединений трубных элементов спиралей и их хвостовиков, а

также в параметрах среды (питательной воды), подаваемой при номинальном давлении 12,0 МПа в спираль, где питательная вода нагревается до температуры 235 °С, вследствие чего в процессе эксплуатации ПВД сварные соединения их спиралей подвергаются коррозионно-эрозионному износу. Поэтому проектирование, изготовление и восстановительный ремонт спиралей ПВД имеют свою специфику [3–5], определяющую технические требования к материалу, конструкции и сварным соединениям ПВД.

Внешний вид одного из наиболее распространенных вариантов спирали ПВД показан на рис. 1.

Конструктивно спираль ПВД состоит из трех трубных элементов, соединенных между собой двумя сварными стыковыми швами. Заготовками



Рис. 1. Общий вид спирали ПВД

*В работе принимали участие А. М. Жерносеков, В. Ю. Буряк, М. И. Скопюк, В. М. Пышный, В. Б. Кудряшев, А. В. Ковалюк.

для этих элементов служат длинномерные отрезки трубы с номинальным диаметром 32 мм и номинальной толщиной стенки 4,0 мм из углеродистой стали 20. Длина одного из прямых отрезков («центрального»), используемых в качестве заготовок для трубных элементов спирали ПВД, составляет 7000 мм, двух других прямых отрезков — 5980 и 5403 мм, соответственно. Все указанные отрезки со стороны своих торцов имеют V-образную разделку 1-24-1 (С-24-1), которая формируется с помощью предшествующей станочной обработки. После выполнения сварных соединений трубных элементов, их термообработки и неразрушающего контроля из полученной таким образом трубной плети с помощью специального приспособления формируют собственно спиральную конструкцию. К прямым входному и выходному участкам этой конструкции приваривают хвостовики и осуществляют неразрушающий контроль их сварных соединений, которые, как показал многолетний опыт, при эксплуатации ПВД наиболее подвержены коррозионно-эрозионным повреждениям. С учетом этого, при проведении восстановительного ремонта спиралей ПВД производят замену вышедших из строя хвостовиков из стали 20 на хвостовики из хромоникелевой стали аустенитного класса (преимущественно, стали 12Х18Н10Т).

До настоящего времени при изготовлении и восстановительном ремонте спиралей ПВД даже в заводских условиях для выполнения сварных соединений этих спиралей в отечественной практике применяют исключительно способ ручной многопроходной аргонодуговой сварки (WIG), основными недостатками которого являются низкая производительность сварки, невозможность поддержания стабильности качества сварных соединений из-за его зависимости от «человеческого» фактора, необходимость привлечения опытных высококвалифицированных сварщиков. Поэтому увеличение производительности сварки и обеспечение стабильности качества сварных соединений спиралей ПВД при их изготовлении и восстановительном ремонте на отечественных предприятиях путем применения автоматической либо механизированной дуговой сварки представляет собой актуальную задачу.

Для ее решения были экспериментально проверены возможности применения различных способов дуговой сварки, в том числе автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (GTAW), ручной и автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов с активирующими флюсами (ATIG и GTAW-A, соответственно) и механизированной (автоматической) сварки плавящимся электродом в среде защитных газов.

Согласно ПН АЭ и другим действующим в Украине нормативным документам, сварные соединения трубных элементов спиралей ПВД должны выполняться с полным проваром с предельным усилением $2,0 \pm 1,0$ мм и выпуклостью корневого сварного шва не более 1,5 мм или его вогнутостью, не превышающей 0,6 мм. При этом смещение кромок трубных элементов спиралей ПВД должны не превышать 0,4 мм, а сварные соединения этих трубных элементов могут быть отнесены к категории III (подкатегория IIIc) по ПН АЭ Г-7-010-89.

Сварные соединения трубных элементов их спиралей подлежат 100 %-му неразрушающему и выборочно-разрушающему контролю. Среди неразрушающих методов контроля предусматривается применение визуально-инструментального контроля (ВИК) и радиографического контроля (РГК) [6]. При выборочном разрушающем контроле сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД осуществляют проверку химического состава металла сварного шва и определяют механические свойства сварных соединений, а также проводятся металлографические исследования.

При выполнении экспериментальных и технологических работ и исследований использовались образцы-имитаторы трубных элементов спиралей ПВД из стали 20 с номинальным внешним диаметром 32 мм и номинальной толщиной стенки 4,0 мм, кромки которых были механически обработаны в соответствии с требованиями ПН АЭ Г-7-009-89, ПН АЭ Г-7-010-89 и ОСТ 24.125.02-89.

В ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ были проведены исследования по определению возможности использования способа GTAW методами автоопрессовки или последовательного проплавления, разработанными в Научно-исследовательском и конструкторском институте монтажных технологий (НИКИМТ) в 1970–1980 гг. [7, 8]. Экспериментально установлено [9], что достигнуть стабильного требуемого качества сварных соединений спиралей ПВД с помощью GTAW методами автоопрессовки или последовательного проплавления не представляется возможным из-за физических свойств материала трубы спирали ПВД и ее геометрических размеров. Даже при допустимом уменьшении толщины стенки труб до 3,6 мм проплавление стенки по всему ее периметру было во всех случаях неравномерным, а его глубина не превышала 0,8 номинальной толщины. Это объясняется тем, что, во-первых, углеродистые стали (к которым относится и сталь 20) по сравнению со сталями аустенитного класса имеют значительно более низкий коэффициент линейного расширения и суще-

ственно более высокую теплопроводность, а это не позволяет обеспечить достаточные сжимающие усилия для необходимых термопластических деформаций. Во-вторых, номинальная толщина стенки трубопровода спирали ПВД составляет 4,0 мм, а отношение толщины стенки S к номинальному внешнему диаметру трубопровода $D_{тр}$ составляет всего 0,125, т. е. близко к нижнему пределу применимости GTAW методами автоопрессовки или последовательного проплавления. Экспериментальным путем установлено, что совокупность этих факторов в сочетании с реальными условиями теплоотвода при сварке не позволяет в случае применения способа GTAW обеспечивать ни регламентированное нормативной и конструкторской документацией полное проплавление сварных соединений спиралей ПВД, ни стабильность качества формирования их сварных швов.

Известно [10–14], что при TIG или GTAW способах сварки возможно путем использования активирующих флюсов увеличить в 2...3 раза глубину проплавления. Однако присущие способам сварки ATIG и GTAW-A недостатки, связанные с отсутствием средств механизированного нанесения слоя активирующего флюса, сложность контроля равномерности наносимого слоя, а также по возможности использования флюсов в виде аэрозолей, являются причиной того, что до настоящего времени ATIG и GTAW-A в отечественной атомной энергетике практически не применяются.

Одним из наиболее распространенных и востребованных технологических процессов при различных видах производства является механизированная сварка плавящимся электродом в среде активных газов (MAG) — преимущественно в среде CO_2 [15, 16].

Известно, что по сравнению с ручными способами дуговой сварки покрытыми или неплавящимся электродами процесс MAG отличается значительными преимуществами, но вместе с тем этому способу сварки присущ и ряд недостатков, среди которых для сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД наибольшее отрицательное значение имеют относительно низкое качество поверхности сварного шва — неровности и грубая чешуйчатость и относительно низкая устойчивость процесса сварки при значительном количестве коротких замыканий дугового промежутка.

В результате проведенных в НИЦ СКАЭ экспериментов установлено, что при сварке поворотных соединений спиралей ПВД способ MAG обеспечивает высокую производительность процесса сварки и необходимую глубину проплавления, однако при этом надлежащее формирование сварного шва принципиально недостижимо, в силу чего имеются все основания считать, что для выполне-

ния сварных соединений спиралей ПВД способ MAG практически мало пригоден.

В то же время во всех промышленно развитых странах и в Украине широкое развитие получила механизированная сварка в смесях защитных газов на основе аргона [17–19], при которой к аргону, составляющему 80...95 % общего объема смеси, добавляют небольшое количество кислорода или другого окислительного газа (чаще всего CO_2), что существенно повышает устойчивость горения дуги, значительно улучшает качество формирования сварных швов и практически исключает область режимов сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. При этом существуют области режимов сварки, характеризующиеся или капельным, или струйным (мелкокапельным) переносом электродного металла. По сравнению с MAG такой характер массопереноса обуславливает ряд технологических преимуществ. И хотя в этом случае в сравнении с MAG проплавляющая способность дуги на 10...20 % снижается и для получения той же глубины проплавления необходимо увеличивать сварочный ток, при сварке плавящимся электродом в смесях защитных газов обеспечивается более качественное формирование сварного шва (гладкая поверхность с плавным переходом на основной металл); уменьшение не менее, чем в 3...4 раза, потерь электродного металла на разбрызгивание; снижение не менее, чем в 8...10 раз трудоемкости зачистки основного металла от брызг; создание благоприятных условий для использования импульсных процессов [18, 19]; возможность сварки постоянным током прямой полярности и при удлиненном вылете; более высокие показатели механических свойств металла шва.

Учитывая присущие способу сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов преимущества, а также результаты выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и НИЦ СКАЭ поисковых и экспериментально-технологических работ, следует отметить, что автоматическая дуговая сварка плавящимся электродом в смесях защитных газов является одним из наиболее эффективных и перспективных способов получения сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД, при этом наиболее рациональным является использование поворотных стыков.

Для проведения экспериментально-технологических работ относительно выполнения поворотных сварных соединений трубных элементов ПВД с помощью MAG и сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов в НИЦ СКАЭ был создан макет сварочной установки, в состав которой входят выпрямитель сварочный ВС-300Б, полуавтомат А-547 с экспериментальными образцами пуль-

та управления и горелки, рассчитанной на подачу электродной проволоки номинальным диаметром 1,0...1,2 мм, а также макет вращателя. Основные параметры макета вращателя приведены ниже.

Основные параметры макета вращателя

Номинальный диаметр трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	32
Номинальная толщина стенки трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	4,0
Пределы регулирования скорости вращения (скорости сварки) свариваемого изделия, об/мин, не менее	1,0...7,0
Номинальное напряжение однофазной сети питания частотой 50 Гц, В	220
Мощность блока питания (преобразователя АС – DC) реверсивного электропривода вращателя, Вт, не менее.....	200
Номинальное выходное напряжение постоянного тока реверсивного электропривода вращателя, В	24

Подготовленные к сварке согласно требованиям нормативных документов и КД образцы-имитаторы трубных элементов спиралей ПВД с V-подобной разделкой кромок из стали 20 подвергали механизированной сварке — MAG и сварке плавящимся электродом в смесях защитных газов. Предварительно методом TIG выполняли две-три прихватки для каждого шва в среде аргона на сварочном токе 80...100 А, для чего использовали опытный образец специализированного источника питания ИЦ 617 УЗ.1 для TIG. По результатам выполнения нескольких серий опытных сварок установлено:

- сварные соединения, которые выполнялись способом MAG с принудительными короткими замыканиями тонкой электродной проволоки, обеспечивали необходимую глубину провара, однако требовали тщательного подбора режима сварки и поддержания в процессе сварки параметров этого режима с точностью не хуже $\pm 5\%$, при этом в некоторых образцах — имитаторах трубных элементов спиралей ПВД наблюдались дефекты сварных швов, наиболее характерными из которых являются проседания шва, подрезы, отсутствие плавного перехода к основному металлу, грубая чешуйчатость облицовочной поверхности;

- сварные соединения, которые выполнялись способом сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов, не только обеспечивали необходимую глубину провара, но и практически не имели недопустимых дефектов, причем в этом случае наблюдался благоприятный перенос электродного металла, при котором практически отсутствуют разбрызгивание и забрызгивание свариваемого изделия, а качество сварных соединений полностью соответствует требованиям ПНАЭ Г-7-009-89.

Также были определены и оптимизированы основные требования к технологическому оборудованию для механизированной сварки (способом сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов) соединений трубных элементов спира-

лей ПВД. Значения основных оптимизированных параметров технологического оборудования для механизированной сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов соединений трубных элементов спиралей ПВД приведены ниже.

Основные оптимизированные параметры технологического оборудования для механизированной сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов соединений трубных элементов спиралей ПВД

Номинальный диаметр трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	32
Номинальная толщина стенки трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	4,0
Диапазон регулирования сварочного тока, А	110...130
Диапазон регулирования рабочего напряжения дуги, В	20...24
Номинальный диаметр плавящегося электрода (электродной проволоки) преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С), мм.....	1,0
Диапазон регулирования скорости вращения (скорости сварки) свариваемого изделия, об/мин	1...7
Диапазон регулирования скорости подачи плавящегося электрода (электродной проволоки преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С), м/ч	120...160
Смещение оси плавящегося электрода (электродной проволоки) относительно вертикали («зенита»), град. угловые	15...20
Смещение оси плавящегося электрода (электродной проволоки) относительно вертикали («зенита»), мм.....	10...15
Количество полнокольцевых проходов дуги при выполнении одного сварного соединения, не более.....	2
Длительность цикла сварки одного соединения, с, не более	5,0
Охлаждение горелки	Газовое

Экспериментально-технологическими исследованиями установлено, что кроме соответствия требованиям, технологическое оборудование для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД должно обеспечивать в процессе сварки стабильность таких параметров, как сварочный ток, рабочее напряжение сварочной дуги, скорость вращения (скорость сварки) с точностью не хуже $\pm 4\%$, скорость подачи плавящегося электрода (электродной проволоки) с точностью не хуже $\pm 5\%$, длительность цикла сварки с точностью не хуже $\pm 10\%$, а также надежное зажатие и центрирование обоих подлежащих сварке между собой трубных элементов с целью осуществления их синхронного вращения и исключения необходимости применения предварительных прихваток.

Исходя из этого, НИЦ СКАЭ разработаны инновационные технические предложения по построению основных частей такого технологического оборудования. Одной из наиболее важных основных составных частей комплекса технологического оборудования для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД является его горизонтальный вращатель.

Согласно разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ техническим предложениям, сварочная часть комплекса технологического оборудования для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД должна по меньшей мере содержать блок управления циклом сварки (БУЦС), сварочный источник питания (СИП), преимущественно инверторного типа, с жесткими или пологопадающими внешними вольт-амперными характеристиками (ВАХ), горелку для MIG/MAG с газовым охлаждением и блок пуско-защитной аппаратуры (БПЗА).

БУЦС предназначен для управления процессом сварки, циклограмма которого приведена на рис. 2. БУЦС обеспечивает два способа управления работой составных частей и исполнительных механизмов технологического оборудования для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД — «вручную» и «автоматическое» при двух видах функционирования этого оборудования — «наладка» и «сварка», а также плавное регулирование и предварительное задание (установление) значений скорости подачи электродной проволоки, длительности интервалов времени «газ до сварки», процесса собственно сварки (до момента поступления переднего фронта сигнала (импульса) «стоп», «газ после сварки» и автоматическую стабилизацию этих значений в процессе наладки или сварки.

В результате экспериментально-технологических исследований определено, что для осуществления выполнения качественных многопроходных сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД способом сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов на основе аргона оптимальная область режимов сварки должна иметь следующие значения параметров: сварочный ток 110...130 А; рабочее напряжение дуги 21...23 В; скорость сварки 1...6 об/мин, а в качестве плавящегося электрода должна использоваться электродная проволока (преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С) с номинальным диаметром 1,0 мм, причем скорость ее подачи должна быть в пределах 120...160 м/ч.

Также было установлено, что среди множества СИП инверторного типа, предлагаемых отечественным рынком, для удовлетворения приведенных выше требований наиболее целесообразным является применение распространенного в Украине СИП инверторного типа MIG/MAG/TIG/MMA 303 разработки и производства фирмы «Tesla Weld», содержащий в однокорпусном исполнении СИП и устройство для автоматической подачи электродной проволоки MIG 303 со стандартным четырехроликовым механизмом подачи. Основные технические характеристики и ВАХ

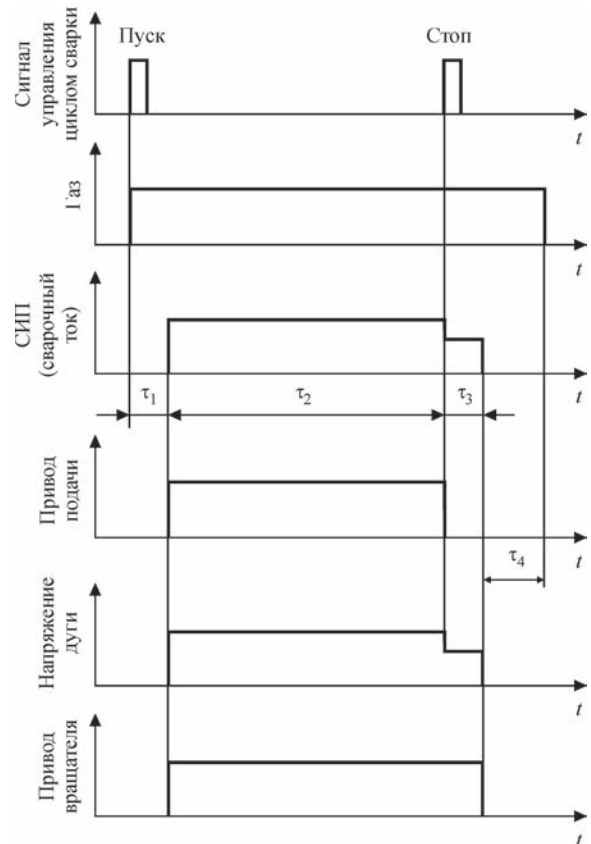


Рис. 2. Циклограмма процесса сварки трубных элементов спиралей ПВД: τ_1 — интервал времени «газ до сварки»; τ_2 — интервал времени, в течение которого происходит собственно сварка без перерыва между первым и вторым проходами дуги; τ_3 — интервал времени, в течение которого происходит «растяжка» сварочной дуги до момента ее полного обрыва и заварки «кратера»; τ_4 — интервал времени «газ после сварки»

этого СИП пригодны для реализации указанных технических требований за исключением длительностей интервалов времени «газ до сварки» и «газ после сварки». Кроме того, в соответствии с алгоритмом работы этого СИП естественное обгорание электродной проволоки при завершении цикла сварки и автоматическое выключение сварочного тока, прекращение подачи электродной проволоки и выключение отсекающего газа (газового клапана) происходят почти одновременно. Для устранения отмеченных недостатков СИП типа MIG/MAG/TIG/MMA 303 (свойственных и другим предлагаемым рынком Украины его аналогам) в НИЦ СКАЭ и были выполнены разработка БУЦС и доработка системы управления этого СИП.

Изготовление и испытания макетов узлов БУЦС и доработка системы управления СИП типа MIG/MAG/TIG/MMA 303 позволили установить, что в таком варианте этот доработанный СИП при сохранении всех присущих ему технических характеристик способен обеспечить выполнение изображенного на рис. 2 цикла сварки, при этом диапазон регулирования длительности интервала времени «газ до сварки» составляет, по крайней

мере, от 1,0 до 10,0 с, а диапазон регулирования длительности интервала времени «газ после сварки» — не менее, чем от 10,0 до 30,0 с.

С целью упрощения подсоединения составляющих технологического оборудования для механизированной (автоматической) сварки трубных элементов спиралей ПВД к сети питания, предоставления возможности осуществления режима «аварийный стоп» по команде оператора или автоматически с практически мгновенным и полным обесточиванием этих всех без исключения составляющих и введения их дополнительной автоматической защиты от длительной перегрузки по току потребления и от устойчивого короткого замыкания в НИЦ СКАЭ разработан и спроектирован БПЗА.

Выводы

1. Механизированная дуговая сварка в смеси газов является наиболее эффективным и целесообразным способом многопроходной сварки — плавящимся электродом для применения при изготовлении и восстановительном ремонте ПВД.

2. Определены и оптимизированы основные требования к технологическому оборудованию для механизированной сварки стыков трубных элементов спиралей ПВД, а также область основных оптимизированных параметров режима сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов (электродной проволокой сплошного сечения преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С с номинальным диаметром 1,0 мм). При этом установлено, что для получения качественных сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД достаточно двух сварочных проходов.

3. Разработаны технические предложения по созданию комплекса технологического оборудования для механизированной (автоматической) сварки поворотных стыков трубных элементов спиралей ПВД.

Список литературы

1. Єфімов О. В., Пилипенко М. М., Потаніна Т. В. та ін. (2017) *Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі*. Єфімова О. В. (ред.). Харків, ТОВ «В справі».
2. Buongiorno J. (2010) *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
3. Воронин Л. М. (1980) *Особенности проектирования и сооружения АЭС*. Москва, Атомиздат.
4. (2003) П-45-3 *Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды для объектов использования атомной энергии*. Утверждены Постановлением Госатомнадзора России № 3 и Госгортехнадзора России № 100 от 19.06.2003. Москва, НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России.
5. Марушкин В. М., Иващенко С. С., Вакуленко Б. Ф. (1985) *Подогреватели высокого давления турбоустановок ТЭС и АЭС*. Москва, Энергоатомиздат.
6. Троицкий В. А. (2006) *Краткое пособие по контролю качества сварных соединений*. Киев, Феникс.

7. Букаров В. А. (2002) Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах. *Сварка в атомной промышленности и энергетике*. Тр. НИКИМТ. Т. 1, сс. 149–210.
8. Ищенко Ю. С. (2002) Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки. *Там же*. Т. 2, сс. 204–240.
9. Коротынский А. Е., Махлин Н. М., Богдановский В. А. и др. (2011) Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций. *Автоматическая сварка*, **11**, 34–44.
10. Савицкий М. М., Кушниренко Б. М., Олейник О. И. (1999) Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активизирующими флюсами (АТИГ-процесс). *Там же*, **2**, 20–28.
11. Байич Д. Р., Савицкий М. М., Мельничук Г. М., Лупан А. Ф. (2002) Сварка АТИГ конструкционных сталей, применяемых в энергетическом оборудовании. *Там же*, **9**, 35–38.
12. Байич Д. Р., Мельничук Г. М., Лупан А. Ф., Савицкий М. М. (2002) Техника и режимы аргонодуговой сварки сталей с активизирующими флюсами. *Там же*, **10**, 34–37.
13. Gordon J. R. (1995) Perspectives on welding research and development in the USA. *Weld. Review Intern.*, **9**, 95–108.
14. Станкевич И. Я., Дмитриев В. И., Корида В. Л. и др. (1982) Применение активизирующего флюса при автоматической сварке трубопроводов. *Энергетическое строительство*, **10**, 19–20.
15. Потапьевский А. Г. (1974) *Сварка в защитных газах плавящимся электродом*. Москва, Машиностроение.
16. Кононенко В. Я. (2007) *Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом*. Киев, ТОВ «Ника – Принт».
17. Свещинский В. Г., Римский С. Т., Галинич В. И. (1994) Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины. *Автоматическая сварка*, **4**, 41–44.
18. Римский С. Т., Свещинский В. Г., Шейко П. П. и др. (1993) Импульснодуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом. *Там же*, **2**, 38–41.
19. Aichele G. (1990) Use of the pulsed technique – active gas metal – arc welding. *Schweißen und Schneiden*, **4**, E62–E63.
20. (2017) Лобанов Л. М., Водолазский В. С., Махлин Н. М., Коротынский О. С., Жерносков А. М., Попов В. С., Скопюк М. І. *Горизонтальный обертач для дугового зварювання деталей трубних конструкцій*. Україна, Заявка а2017 11752.

References

1. Efimov, O.V., Pylypenko, M.M., Potanina, T.V. et al. (2017) *Reactors and steam generators of power generating units of NPP: schemes, processes, materials, structures, models*. Ed. by O.V. Efimov. Kharkiv, TOV «V spravi» [in Ukrainian].
2. Buongiorno, J. (2010) *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
3. Voronin, L.M. (1980) *Peculiarities of design and construction of NPP*. Moscow, Atomizdat [in Russian].
4. (2003) P-45-3: *Regulations of arrangement and safe operation of steam and hot water line for facilities of nuclear power consumption*. Moscow, NTTs YaRB Gosatomnadzor Rossii [in Russian].
5. Marushkin, V.M., Ivashchenko, S.S., Vakulenko, B.F. (1985) *High-pressure heaters of TPP and NPP turbo installations*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
6. Troitsky, V.A. (2006) *Concise manual on quality control of welded joints*. Kiev, Feniks.
7. Bukarov, V.A. (2002) Technology of automatic arc shielded-gas welding. In: *Welding in nuclear industry and engineering*: Transact. NIKIMT, Vol. 1, 149–210 [in Russian].
8. Ishchenko, Yu.S. (2002) Physical-technological fundamentals of weld formation in arc welding process. *Ibid.*, Vol. 2, 204–240 [in Russian].

9. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2011) Single- and multioperator systems for automatic welding of position butt joints of nuclear power plant piping. *The Paton Welding J.*, **11**, 28-36.
10. Savitsky, M.M., Kushnirenko, B.M., Olejnik, O.I. (1999) Peculiarities of tungsten electrode welding of steels with activating fluxes (ATIG-process). *Avtomatich. Svarka*, **1**, 20-28 [in Russian].
11. Bajic, D.R., Savitsky, M.M., Melnichuk, G.M. et al. (2002) A-TIG welding of structural steels for power engineering applications. *The Paton Welding J.*, **9**, 30-34.
12. Bajic, D.R., Melnichuk, G.M., Lupan, A.F. et al. (2002) Procedure and parameters of A-TIG welding of structural steels. *Ibid.*, **10**, 31-34.
13. Gordon, J.R. (1995) Perspectives on welding research and development in the USA. *Weld. Review Intern.*, **9**, 95-108.
14. Stankevich, I.Ya., Dmitriev, V.I., Korida, V.L. et al. (1982) Application of activating flux in automatic welding of pipelines. *Energeticheskoe Stroitelstvo*, **10**, 19-20 [in Russian].
15. Potapievsky, A.G. (1974) *Consumable electrode shielded-gas welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
16. Kononenko, V.Ya. (2007) *Consumable and nonconsumable electrode shielded-gas welding*. Kiev, TOV Nika-Print [in Russian].
17. Svetsinsky, V.G., Rimsky, S.T., Galinich, V.I. (1994) Welding of steels in shielding gas mixtures on argon base in industry of Ukraine. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 41-44 [in Russian].
18. Rimsky, S.T., Svetsinsky, V.G., Shejko, P.P. et al. (1993) Consumable electrode pulsed arc welding in mixture of argon with carbon-dioxide gas. *Ibid.*, **2**, 38-41 [in Russian].
19. Aichele, G. (1990) Use of the pulsed technique – active gas metal – arc welding. *Schweissen und Schneiden*, **4**, E62-E63.
20. Lobanov, L.M., Vodolazsky, V.E., Makhlin, N.M., Korotynsky, O.E. et al. (2017) *Horizontal manipulator for arc welding of tubular structure parts*. Ukraine, Appl. A2017 11752 [in Ukrainian].

Н. М. Махлін¹, В. Є. Водолазський¹, В. Є. Попов¹,
О. Є. Коротинський², С. І. Лавров³

¹ДП «НДЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України».
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

³ДВ «Атоменергомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом».

71503, м. Енергодар, Запорізької обл., а/с 306.

E-mail: lavrov@aem.zp.ua

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПРИ
ВИГОТОВЛЕННІ І ВІДНОВНОМУ РЕМОНТІ СПІРАЛЕЙ

ПІДГРІВАЧІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

Підігрівачі високого тиску — принципово необхідні ланки другого контуру енергоблоків атомних електростанцій з легководними реакторами типу ВВЕР. Вони являють собою одноплосинні або двохплосинні трубні спіралі з вуглецевої сталі. У роботі наведено результати вибору і відпрацювання технології механізованого зварювання для використання при виготовленні та відновному ремонті підігрівачів високого тиску. Бібліогр. 20, рис. 2.

Ключові слова: підігрівачі високого тиску, спіралі підігрівачів високого тиску, автоматичне зварювання, плавкий електрод, електродний дріт, суміш захисних газів, технологічне обладнання, поворотні стики трубопроводів, зварювальний обертач

N.M. Makhlin, V.E. Vodolazsky, A.E. Popov,
A.E. Korotynsky, S.I. Lavrov

¹SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

³SE «Atomenergomash» of the SE NNEGC «Energoatom».

71503, Energodar, Zaporozhye region, PO Box 306.

E-mail: lavrov@aem.zp.ua

SELECTION OF WELDING TECHNOLOGY IN MANUFACTURE AND RESTORATION REPAIR OF SPIRALS OF HIGH-PRESSURE HEATERS OF POWER UNITS OF NPP

The high-pressure heaters are the fundamentally necessary links of the second circuit power units of nuclear power plants with light water VVER-type reactors. They represent one-plane or two-plane piped spirals of carbon steel. The paper presents the results of selection and mastering the mechanized welding technology for applying high-pressure heaters in the manufacture and renovation repair. 20 Ref., 2 Fig.

Keywords: high-pressure heaters, spirals of high-pressure heaters, automatic welding, consumable electrode, electrode wire, mixture of shielding gases, technological equipment, rotary joints of pipelines, welding rotator

Поступила в редакцию 10.01.2018



Международная инженерная ярмарка

1–5 октября 2018 г.

Брно, Чехия



В рамках ярмарки из пяти выставок будет проведена
24-я Международная выставка сварочных технологий.

Основная тема ярмарки — Индустрия 4.0
(автоматизация, роботизация, цифровые технологии).

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫМИ ЛЕНТАМИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТВЕРДОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

А. П. ВОРОНЧУК, А. П. ЖУДРА, А. В. ПЕТРОВ, В. В. ФЕДОСЕНКО

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

Изучено влияние режимов наплавки открытой дугой порошковыми лентами различных типов на химический состав и твердость наплавленного металла. В качестве объектов исследований выбраны порошковые ленты ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179, изготовленные на основе стальной ленты-оболочки, а также лента ПЛ-АН 111 на основе никелевой оболочки. Наплавка проводилась на аппарате А-874Н с источником питания ВДУ-1201 и приставкой АД-167 в широком диапазоне режимов. Установлены зависимости изменения химического состава наплавленного металла от значения тока, напряжения и скорости наплавки. При этом изменение значений тока в диапазоне 600...1100 А незначительно отражается на химическом составе металла, наплавленного лентами ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 111, а при наплавке лентой ПЛ-АН 179 приводит к увеличению содержания практически всех легирующих элементов. Увеличение напряжения и скорости наплавки приводит к снижению степени легирования для всех типов порошковых лент и, соответственно, к снижению твердости наплавленного металла, а увеличение тока — к ее росту. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: порошковая лента, режимы наплавки, химический состав, твердость

При получении данных, характеризующих влияние режимов наплавки порошковыми лентами открытой дугой на геометрические размеры наплавленных валиков, опубликованных в работе [1], параллельно изучали влияние режимов наплавки на химический состав и твердость наплавленного металла. Исследование этих параметров является важной задачей, так как изменение режимов наплавки существенно влияет на процессы перехода легирующих элементов в сварочную ванну, что, в свою очередь, отражается на показателях твердости и служебных характеристиках наплавленного слоя. Эти данные также необходимы для расчета порошковых лент при прогнозировании составов наплавленного металла.

Известны работы [2, 3], в которых химический состав наплавленного металла рассматривался во взаимосвязи с переходом легирующих компонентов при наплавке под флюсом в зависимости от тока, напряжения и скорости наплавки. Было показано [4, 5], что в ряде случаев при увеличении сварочного тока наблюдается увеличение содержания углерода, при этом снижается содержание марганца и кремния в наплавленном металле.

Авторы работ [6, 7] отмечают, что при наплавке порошковыми лентами возможны ситуации, когда часть порошка наполнителя переходит в сварочную ванну, минуя стадию капли. Но как показали дополнительные исследования [6, 8], это характерно не для всех конструкций порошковых лент. Так, однозамковая конструкция порошковой ленты с плотным замком позволила практически полностью избавиться-

ся от просыпания порошка-наполнителя в сварочную ванну, поэтому в настоящее время промышленность в основном перешла на использование такого типа порошковых лент.

Для исследований были выбраны три марки порошковых лент ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2 (ПЛ-АН 101), ПЛ-Нп-500Х40Н40С2РЦ (ПЛ-АН 111) и ПЛ-Нп-400Х20Б7М6В2Ф (ПЛ-АН 179) однозамковой конструкции типа Б по ГОСТ 26467-85 сечением 16,5×3,8 мм. Такой выбор материалов позволил исследовать достаточно широкий диапазон составов наплавленного металла, так как порошковые ленты ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179 изготавливаются на основе стальной ленты-оболочки, а ПЛ-АН 111 — никелевой. Опыты выполнялись на наплавочном аппарате А-874Н, укомплектованном источником питания ВДУ-1201 и приставкой АД-167. Наплавка выполнялась отдельными валиками в один слой на постоянном токе обратной полярности при неизменной величине вылета, равной 50 мм, и жесткой внешней характеристике источника питания. В качестве основного металла использовались пластины из стали Ст3 толщиной 30 мм размером 300×400 мм. На каждую из пластин наплавлялось по 6 валиков длиной 200...250 мм. Чтобы исключить влияние предварительного подогрева каждый последующий валик наносился после полного остывания предыдущего. Из средних участков валиков анодно-механической резкой были вырезаны образцы, на которых после последующей шлифовки определяли химический состав и твердость наплавленного

Режимы наплавки

I, A	U, B	$v, м/ч$
600 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
750 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
1150 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
1200 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	24 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	28 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	36 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	40 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	19 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	40 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	48 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	55 ± 1

металла. Режимы наплавки всеми приведенными лентами представлены в таблице.

Оценку химического состава наплавленного слоя выполняли спектральными методом, а твердость наплавленного металла — по ГОСТ 9013-59 как среднеарифметическое не менее, чем при 20 измерениях. Полученные результаты представлены в графическом виде.

На рис. 1 приведены данные о химическом составе валика, наплавленного порошковой лентой ПЛ-АН 101, в зависимости от тока, напряжения и скорости наплавки, соответственно. При увеличении тока от 600 до 1200 А химический состав наплавленного металла изменяется незначительно (рис. 1, а). При увеличении напряжения от 24 до 38 В наблюдается заметное снижение содержания углерода и хрома. Снижается также содержание кремния в наплавленном слое. Содержание марганца и никеля при этом практически не изменяется (рис. 1, б). Отмеченное снижение содержания углерода и хрома, очевидно, связано с увеличением доли основного металла в наплавленном и увеличением угара этих элементов на стадии капли и в сварочной ванне вследствие увеличения длины дуги.

При увеличении скорости наплавки содержание всех элементов в наплавленном слое снижается, что, очевидно, связано с увеличением потерь на разбрызгивание (рис. 1, в).

На рис. 2 приведен химический состав металла, наплавленного лентой ПЛ-АН 111, в зависимости от параметров наплавки. Изменение тока в диапазоне от 600 до 1200 А также практически не отражается на химическом составе (рис. 2, а). Увеличение напряжения от 24 до 38 В приводит, в основном, к снижению содержания углерода и хрома, что связано с увеличением доли основного металла в наплавленном и угаром легирующих элементов (рис. 2, б). Минимальные содержания углерода и хрома в напла-

Cr, мас. % C, Si, Mn, Ni, мас. %

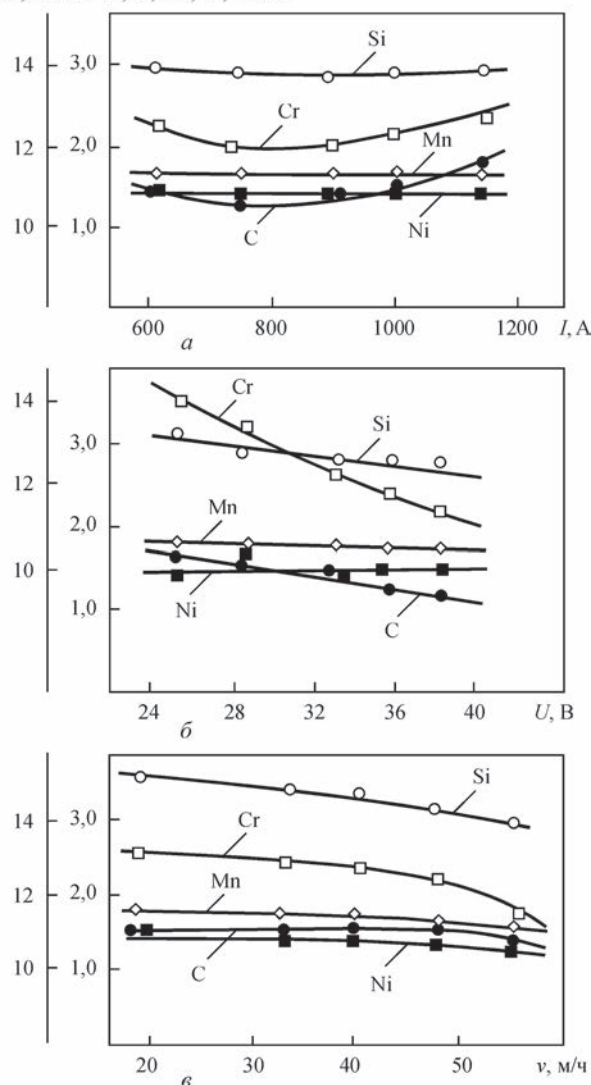


Рис. 1. Химический состав металла, наплавленного порошковой лентой ПЛ-АН 101, в зависимости от тока наплавки (а), напряжения (б) и скорости (в)

ленном металле соответствуют скорости наплавки 40...50 м/ч (рис. 2, в).

На рис. 3 представлен химический состав металла, наплавленного порошковой лентой ПЛ-АН 179, в зависимости от параметров наплавки. Повышение значений сварочного тока в диапазоне от 600 до 1200 А приводит к увеличению содержания всех легирующих элементов в наплавленном металле кроме марганца, содержание которого несколько снижается (рис. 3, а). Увеличение напряжения приводит к снижению степени легирования углеродом, хромом, молибденом и ниобием во всем рассматриваемом диапазоне от 24 до 38 В. Содержание марганца и кремния остается практически неизменным (рис. 3, б). Увеличение скорости от 19 до 55 м/ч приводит к снижению содержания практически всех легирующих элементов в наплавленном слое (рис. 3, в).

На рис. 4 представлены зависимости твердости наплавленного слоя от скорости наплавки, на-

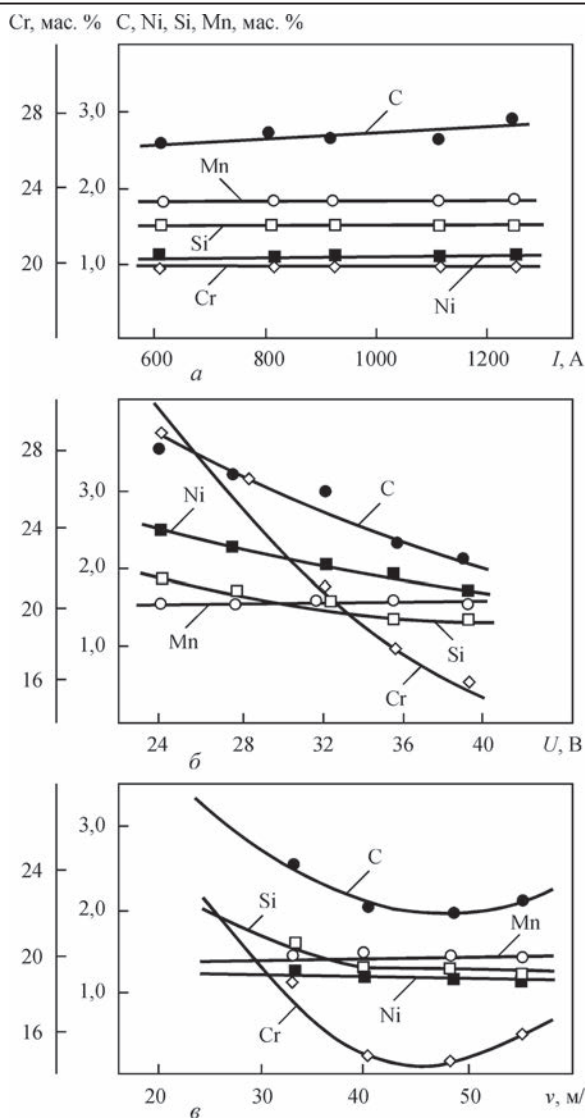


Рис. 2. Химический состав металла, наплавленного порошковой лентой ПЛ-АН 111, в зависимости от тока наплавки (а), напряжения (б) и скорости (в)

пряжения дуги и сварочного тока. Как видно из представленных графиков, увеличение скорости наплавки (рис. 4, в) и напряжения (рис. 4, б) приводят к снижению твердости наплавленного слоя, а увеличение тока (рис. 4, а) — к незначительному росту.

Рассматривая полученные результаты в целом, следует отметить следующее. На характеристики плавления порошковых лент, а, следовательно, химический состав и твердость наплавленного металла помимо режимов наплавки оказывают существенное влияние состав порошка-наполнителя и материал ленты-оболочки. Так, при наплавке порошковой лентой ПЛ-АН 111, изготовленной на основе никелевой ленты-оболочки, все исследуемые характеристики в значительной мере отличаются от данных, полученных при наплавке порошковыми лентами ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179, выполненными из стальной ленты-оболочки. На наш взгляд это связано с более низким, приблизи-

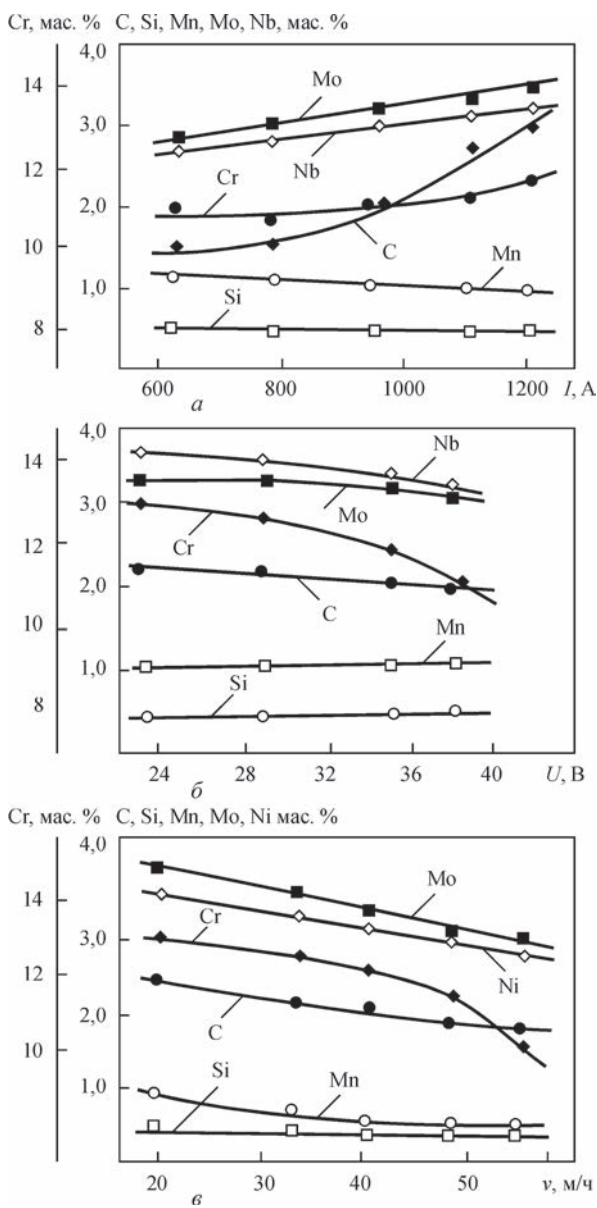


Рис. 3. Химический состав металла, наплавленного порошковой лентой ПЛ-АН 179, в зависимости от тока наплавки (а), напряжения (б) и скорости (в)

тельно в 1,5 раза, омическим сопротивлением никеля по сравнению с низколегированной сталью.

При наплавке порошковой лентой ПЛ-АН 101 увеличение тока приводит к незначительному изменению химического состава наплавленного металла, а увеличение напряжения — к существенному снижению содержания хрома, углерода и кремния при стабильных показателях содержания марганца и никеля. Как правило, увеличение напряжения приводит к увеличению дугового промежутка, что обуславливает повышенный угар основных легирующих компонентов на стадии капли.

Увеличение тока при наплавке порошковой лентой ПЛ-АН 179 приводит к увеличению содержания всех легирующих элементов и углерода при стабильном содержании марганца и кремния. Увеличение напряжения незначительно влияет на

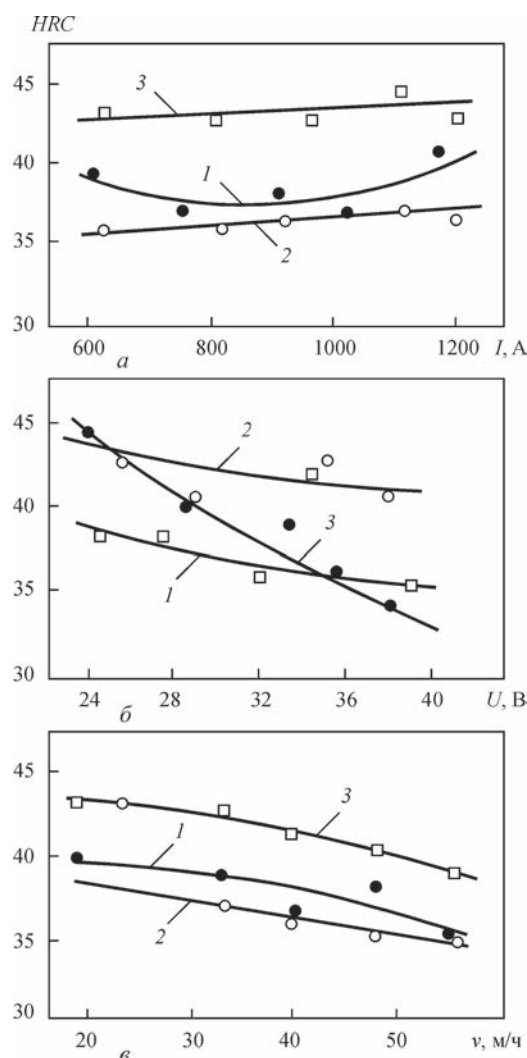


Рис. 4. Твердость наплавленного металла в зависимости от тока наплавки (а), напряжения (б) и скорости (в) (1 — ПЛ-АН 101; 2 — ПЛ-АН 111; 3 — ПЛ-АН 179)

содержание легирующих элементов, но заметно снижает содержание углерода. В данном случае мы наблюдаем аналогичный, но менее выраженный, эффект как и в предыдущем случае.

При наплавке порошковой лентой ПЛ-АН 111 изменение показателей тока несущественно влияет на химический состав наплавленного металла, а увеличение значений напряжения приводит к значительному снижению содержания хрома, углерода и никеля при стабильных показателях кремния и марганца, что также связано с увеличением потерь легирующих элементов на стадии капли.

Увеличение скорости наплавки не влияет на содержание кремния и марганца для всех типов порошковых лент, при этом наблюдается снижение легирования для ленты ПЛ-АН 179 и в меньшей степени для ленты ПЛ-АН 101. Для наплавленного металла лентой ПЛ-АН 111 увеличение скорости приводит к уменьшению углерода и хрома, что является следствием увеличения доли основного металла в наплавленном слое.

Некоторое несоответствие результатов влияния параметров режима наплавки на химический состав наплавленного металла, полученного с использованием порошковых лент ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179, на наш взгляд также можно объяснить существенными отличиями составов порошка наполнителя указанных лент. Основой шихты ленты ПЛ-АН 101 является комплексно-легированная лигатура, которая характеризуется менее низкой температурой плавления, чем шихта ленты ПЛ-АН 179, состоящей из компонентов тугоплавких элементов, таких как вольфрам, ниобий, ванадий, молибден.

Твердость металла, наплавленного исследуемыми порошковыми лентами, хорошо коррелируется с его химическим составом.

Список литературы

1. Жудра А. П., Ворончук А. П., Кочура В. О., Федосенко В. В. (2017) Износостойкая наплавка порошковыми лентами. *Автоматическая сварка*, **1**, 43–48.
2. Кравцов Т. Г. (1978) *Электродуговая наплавка электродной лентой*. Москва, Машиностроение.
3. Куделя Е. С., Субботовский В. П. (1954) Исследование состава и однородности высоколегированного наплавленного металла спектральным методом. *Автоматическая сварка*, **3**, 4–81.
4. Фрумин И. И. (1960) *Автоматическая износостойкая наплавка*. Москва, Машиностроение.
5. Фрумин И. И. (1961) *Автоматическая электродуговая наплавка*. Харьков, Metallurgizdat.
6. Юзвенко Ю. А., Горпенюк Б. Н., Шимановский В. П., Корбут В. Л. (1977) Химическая макронеоднородность металла, наплавленного открытой дугой порошковой лентой. В сб. *Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки*, сс. 21–29.
7. Пацкевич И. Р., Фейфец Л. А. (1971) О химической неоднородности слоя, наплавленного порошковой лентой в углекислом газе. *Автоматическая сварка*, **11**, 66–67.
8. Жудра А. П., Ворончук А. П. (2012) Наплавочные порошковые ленты (Обзор). *Там же*, **1**, 39–44.

References

1. Zhudra, A.P., Voronchuk, A.P., Kochura, V.O. et al. (2017) Effect of flux-cored strip surfacing modes on geometric parameters of deposited beads. *The Paton Welding J.*, **1**, 36–40.
2. Kravtsov, T.G. (1978) *Electric arc surfacing with electrode strip*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Kudelya, E.S., Subbotovsky, V.P. (1954) Examination of composition and homogeneity of high-alloy deposited metal by spectral method. *Avtomatich. Svarka*, **3**, 4–81 [in Russian].
4. Frumin, I.I. (1960) *Automatic wear-resistant surfacing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Frumin, I.I. (1961) *Automatic electric arc surfacing*. Kharkov, Metallurgizdat [in Russian].
6. Yuzvenko, Yu.A., Gorpenyuk, B.N., Shimanovsky V.P. et al. (1977) Chemical macroheterogeneity of metal deposited by open arc with flux-cored strip. In: *Theoretical and technological principles of surfacing*, 21–29 [in Russian].
7. Patskevich, I.R., Feifets, L.A. (1971) About chemical heterogeneity of layer deposited with flux-cored strip in carbon-dioxide gas. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 66–67.
8. Zhudra, A.P., Voronchuk, A.P. (2012) Surfacing flux-cored strips (Review). *Ibid.*, **1**, 39–44 [in Russian].

О. П. Ворончук, О. П. Жудра,
О. В. Петров, В. В. Федосенко

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

ВПЛИВ РЕЖИМІВ НАПЛАВЛЕННЯ
ПОРОШКОВИМИ СТРІЧКАМИ НА ХІМІЧНИЙ СКЛАД
І ТВЕРДІСТЬ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

Вивчено вплив режимів наплавлення відкритою дугою порошковими стрічками різних типів на хімічний склад і твердість наплавленого металу. У якості об'єктів досліджень обрані порошкові стрічки ПЛ-АН 101 і ПЛ-АН 179, виготовлені на основі сталевих стрічки-оболонки, а також стрічка ПЛ-АН 111 на основі нікелевої оболонки. Наплавлення проводилося на апараті А-874Н з джерелом живлення ВДУ-1201 і приставкою АД-167 у широкому діапазоні режимів. Встановлено залежності зміни хімічного складу наплавленого металу від значення струму, напруги та швидкості наплавлення. При цьому зміна значень струму в діапазоні 600...1100 А мало відбивається на хімічному складі металу, наплавленого стрічками ПЛ-АН 101 і ПЛ-АН 111, а при напавленні стрічкою ПЛ-АН 179 приводить до збільшення вмісту практично всіх легуючих елементів. Збільшення напруги і швидкості наплавлення приводить до зниження ступеня легування для всіх типів порошкових стрічок і відповідно до зниження твердості наплавленого металу, а збільшення струму — до її зростання. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: порошкова стрічка, режими наплавлення, хімічний склад, твердість

A.P. Voronchuk, A.P. Zhudra, A.V. Petrov, V.V. Fedosenko

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

INFLUENCE OF SURFACING MODES USING
POWDER STRIPS ON CHEMICAL COMPOSITION
AND HARDNESS OF DEPOSITED METAL

The influence of surfacing modes with an open arc using powder strips of different types on chemical composition and hardness of the deposited metal was studied. The powder strips PL-AN 101 and PL-AN 179 manufactured on the basis of a steel strip-sheath as well as the strip PL-AN 111 on the basis of nickel sheath were selected as the objects of investigations. The surfacing was performed in the machine A-874N with the power source VDU-1201 and the attachment AD-167 in a wide range of modes. The dependences of change in the chemical composition of deposited metal on the value of current, voltage and deposition rate were established. At the same time, the change in the current values in the range of 600...1100 A has a little effect on chemical composition of the metal deposited by the strips PL-AN 101 and PL-AN 111, and in surfacing using the strip PL-AN 179 it results in increase in the content of almost all alloying elements. The increase in the voltage and deposition rate leads to decrease in the degree of alloying for all the types of powder strips and, accordingly, to decrease in the hardness of deposited metal and the increase in current leads to its growth. 8 Ref., 1 Tab., 4 Fig.

Keywords: powder strip, surfacing modes, chemical composition, hardness

Поступила в редакцію 14.02.2018

26 міжнародна спеціалізована виставка промислових рішень
«Машинобудування. Металургія – 2018»
та міжнародна науково-практична конференція
«Зварювання: виробництво та застосування – 2018»

22–24 травня

Запоріжжя,
виставковий центр «Козак-Палац»

Запорізький форум — ефективна платформа для успішних презентацій технічних новинок в галузях машинобудування, металургії, ливарних технологій, енергетики, автоматизації, ІТ-рішень. За роки проведення став значною промисловою подією як в масштабах регіону, так і всієї країни. Щорічно виставки об'єднують сотні підприємств з усіх регіонів України, а також представників закордонних компаній.



З питань стосовно участі просимо звертатись в оргкомітет:
тел. (061) 213-50-26, (050) 484-33-67, expo2@cci.zp.ua, www.expo.zp.ua

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТОКОВЕДУЩИХ РАСХОДУЕМЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

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

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

При торцевой электрошлаковой наплавке с использованием нетоковедущих заготовок исследовано влияние удаления наплавляемой поверхности от токоведущей секции токоподводящего кристаллизатора на проплавление основного металла, производительность наплавки и удельный расход электроэнергии. Проведено сравнение влияния на качество биметалла, полученного при электрошлаковой наплавке электродами и нетоковедущими заготовками одного и того же сечения. Установлено, что при введении в шлаковую ванну через токоведущую секцию токоподводящего кристаллизатора оптимальной электрической мощности и использовании плавящихся заготовок, можно достичь заданного проплавления основного металла, хорошего формирования наплавленного слоя и производительности процесса, соизмеримых с теми, что получаются при наплавке электродом того же сечения, только в случае оптимального удаления расплавляемого торца плавящейся заготовки от наплавляемой поверхности изделия. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: торцевая электрошлаковая наплавка, нетоковедущая расходуемая заготовка большого сечения, токоподводящий кристаллизатор, источники питания, наплавляемая поверхность, проплавление основного металла, качество наплавки

К важнейшим показателям электрошлаковой наплавки (ЭШН), помимо проплавления, относятся качество металла наплавляемого слоя и его формирования и, конечно, одно из главных преимуществ электрошлакового процесса – повышенная производительность наплавки по сравнению с другими способами получения биметалла методами сварки.

Для получения качественных биметаллических изделий предложено большое количество способов и технических решений выполнения ЭШН [1]. Одним из простых, но в то же время действенных способов является использование в электрошлаковом процессе, помимо расходуемых электродов, нетоковедущей присадки, чаще всего в виде проволоки. Эта техника введения в шлаковую ванну двух плавящихся сварочных материалов нашла наибольшее применение при электрошлаковой сварке (ЭШС). При этом в качестве электродов используются пластины или электродные проволоки [2–5], а присадка дополнительно подается в виде цельнотянутой или порошковой проволоки, лент [6–8].

В результате использования дополнительной присадки улучшаются форма и размеры металлической ванны, микро- и макроструктура наплавленного металла, а также его механические свойства; повышается производительность процесса сварки, снижается расход электроэнергии. Однако, как отмечается в работе [5], дополнительное введение в шлаковую ванну холодной присадки не может существенно изменить количество тепла,

поступаемое в основной металл из металлической ванны. Это связано с тем, что теплосодержание металлической ванны определяется, в основном, температурой поступающих в нее капель с оплавленного торца электрода. Поэтому в практике ЭШН, в отличие от ЭШС, получило развитие другое направление повышения всех показателей наплавки. Это одновременное применение при ЭШН как расходуемых электродов большого сечения, так и нерасходуемых электродов [9–11]. Но в этом случае, хотя электрическую мощность, подаваемую на расходуемые электроды, можно понизить, тем не менее, влияние перегретых капель электродного металла на температуру металлической ванны, соответственно, на нагрев наплавляемой поверхности изделия сохраняется.

В работе была поставлена задача достижения минимального и равномерного проплавления основного металла при хорошем формировании наплавленного металла путем изменения различных технологических показателей (как электрических, так и геометрических) ЭШН с нерасходуемым электродом кольцевого типа, т.е. токоподводящим кристаллизатором (ТПК), с использованием нетоковедущих расходуемых заготовок большого сечения вместо электродов такого же размера. Представляет интерес сравнить результаты, полученные при ЭШН в ТПК на переменном и постоянном токах с использованием электродов большого сечения, при различных электрических схемах подключения [12, 13], с результатами на-

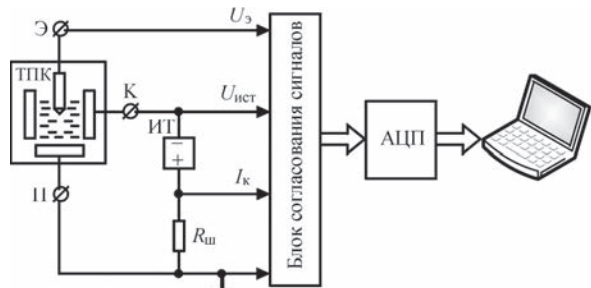


Рис. 1. Структурная схема электрических соединений при выполнении экспериментов по наплавке (Э, К и П — клеммы подсоединения электрода, токоведущей секции кристаллизатора и поддона с изделием, соответственно; ИТ — источник постоянного тока; $R_{ш}$ — измерительный токовый шунт; $U_{ист}$, U_3 , I_k — сигналы, пропорциональные напряжению источника тока, наведенному напряжению на электроде и току кристаллизатора (поддона), соответственно; АЦП — аналого-цифровой преобразователь)

плавки в ТПК того же размера при плавлении нетоковедущих расходуемых заготовок. Методика выполнения экспериментов аналогична той, что представлена в работе [13].

На рис. 1 представлена схема электрических соединений при выполнении экспериментов по наплавке. Проведено пять экспериментов на постоянном токе (33М, 35М, 36М, 37М и 39М) и один эксперимент на переменном токе (6М). В некоторых экспериментах изменяли положение наплавляемой поверхности изделия относительно нижней кромки токоведущей секции кристаллизатора, а именно это удаление h составляло 110, 70 и 44 мм. Эксперименты проводились с нетоковедущими расходуемыми заготовками двух диаметров 90 и 115 мм. Из всех наплавленных образцов изготовлены продольные макрошлифы для оценки глубины проплавления и его равномерности по зоне сплавления.

В таблице приведены показатели режимов ЭШН и оценка качества биметаллических об-

разцов, полученных при выполнении данных экспериментов.

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что показатели качества наплавки для экспериментов, при которых удаление наплавляемой поверхности от токоведущей секции было большое, а именно 110 и 70 мм (эксперименты 6М, 33М и 35М), были лучше, чем для экспериментов 36М, 37М и 39М, у которых $h = 44$ мм. Предположительно это связано с тем, что в первом случае объем шлаковой ванны и ее теплоемкость были больше, и это позволяло обеспечить быстрый нагрев торца нетоковедущей заготовки до температуры плавления при относительно малом значении тока на токоведущей секции кристаллизатора и не перегреть изделие по периферии возле стенок формирующей секции. Кроме того, при большой глубине шлаковой ванны имеются более высокие возможности выбора положения в шлаке торца плавящейся заготовки. При малом значении h практически сложно «удержать» торец плавящейся заготовки на необходимом расстоянии от наплавляемой поверхности, а повышенный ток на токоведущей секции кристаллизатора увеличивает прианодное падение напряжения на изделии и приводит к глубокому проплавлению его периферийной зоны.

Отсюда следует, что при технологической схеме наплавки с нетоковедущей заготовкой, у которой возможности управления процессом наплавки значительно меньше, чем при схеме с плавящимся электродом, нецелесообразно располагать наплавляемую поверхность на небольшом удалении от токоведущей секции кристаллизатора.

На рис. 2, а изображена гистограмма минимальных значений удельных расходов электроэнергии и минимальных значений средней глубины проплавления (рис. 2, б), полученных при выполнении экспериментов ЭШН в ТПК на переменном

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

Номер эксперимента	Диаметр заготовки, мм	Ток, кА	Напряжение, В	Мощность, кВт	V_3 , мм/мин	G , кг/ч	h , м	Q , кВт·ч/кг	Качество наплавки		
									$H_{ср}$, мм	$\Delta_{ср}$, мм	КНП
33М	90	1,81	31,3	56,7	2,14	6,4	110	8,9	1,6	1,2	Удовлетворительное
35М	90	1,65	46,1	76,1	2,0	6,0	110	12,8	1,8	1,3	->-
36М	90	2,59	36,5	94,5	0,5	1,6	44	60,3	8,4	7,2	->-
37М	90	2,57	35,3	90,7	0,42	1,2	44	73,1	8,1	7,2	->-
39М	90	2,52	35,6	89,7	3,8	14,9	44	8,0	7,6	7,0	Хорошее
6М*	115	2,2	36,0	79,2	6,0	16,5	70	4,8	1,5	1,0	->-

Примечание. * — наплавка проводилась на переменном токе; V_3 — средняя скорость движения заготовки; G — производительность наплавки; h — расстояние от наплавляемой поверхности до токоведущей секции; Q — удельный расход электроэнергии; $H_{ср}$ — средняя глубина проплавления; $\Delta_{ср}$ — средняя неравномерность проплавления; КНП — качество формирования наплавляемой поверхности (экспертная оценка).

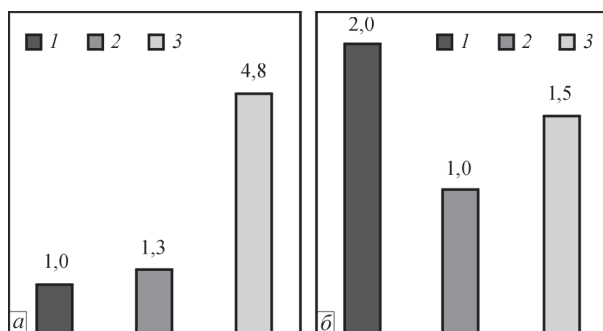


Рис. 2. Гистограмма сопоставления минимальных значений удельных расходов электроэнергии, кВт·ч/кг (а) и минимальных значений средней глубины проплавления, мм (б), полученных при выполнении экспериментов по наплавке в ТПК (1 — переменный ток, для а — $D_3 = 130$ мм; б — 90; 2 — постоянный ток $D_3 = 90$ мм; 3 — нетоковедущая заготовка, $D_3 = 115$ мм)

[12] и постоянном [13] токах, а также при использовании нетоковедущей заготовки. Показатели качества биметалла образцов 33М, 35М и 6М дают основание утверждать, что процесс наплавки по схеме с нетоковедущей заготовкой может конкурировать с ЭШН плавящимся электродом как на переменном, так и на постоянном токах (рис. 2, б). Однако в любом случае необходимо учитывать расположение в шлаковой ванне торца плавящейся заготовки относительно наплавляемой поверхности, так как этот параметр оказывает большое влияние на показатели H_{cp} и Δ_{cp} . Этот факт подтверждается результатами экспериментальных ЭШН (эксперименты 36М, 37М и 39М) (см. таблицу). Все три образца получены в результате расплавления заготовок диаметром 90 мм при практически одинаковых токах и напряжениях и на одинаковом удалении наплавляемой поверхности от токоведущей секции ТПК (44 мм), но при этом удельные расходы электроэнергии значительно отличаются. Это объясняется неконтролируемым изменением положения в шлаке торца плавящейся заготовки относительно наплавляемой поверхности. Определенное влияние на результаты оказало частое извлечение заготовки из шлаковой ванны (для оценки положения торца заготовки в шлаке), что способствовало снижению значений средней скорости движения заготовки.

Также очевидно, что ЭШН с использованием нетоковедущих расходоуемых заготовок не может конкурировать с ЭШН плавящимся электродом по производительности наплавки и удельному расходу электроэнергии. Скорость плавления электрода в ТПК априори выше, чем нетоковедущей заготовки, и соответственно, выше производительность ЭШН. В свою очередь, нагрев нетоковедущей заготовки до температуры плавления через нагрев шлаковой ванны при прохождении через нее только тока кристаллизатора (в отличие от ЭШН плавящимся электродом), приводит к уменьшению концентрации подводимой мощности вблизи заготовки, что повы-

шает удельный расход электроэнергии при ЭШН нетоковедущей заготовкой (рис. 2, а).

Данные, полученные по эксперименту 6М показывают, что при достаточной мощности, подводимой к ТПК, и оптимальном расположении торца нетоковедущей расходоуемой заготовки относительно наплавляемой поверхности, можно достичь хороших показателей проплавления основного металла при высокой энергоэффективности процесса наплавки.

По-видимому, наплавку нетоковедущей расходоуемой заготовкой целесообразно применять в тех случаях, когда, несмотря на повышенный расход электроэнергии, получение минимального проплавления является обязательным условием соединения металлов с резко отличающимися свойствами и однозначно образующими в зоне сплавления хрупкие структуры даже при незначительном их перемещении. Такая технология позволяет с большей гарантией получить минимальное проплавление, чем при наплавке электродом большого сечения по схеме с одинаковыми потенциалами на электроде и токоведущей секции ТПК [11].

В заключение следует отметить, что при ЭШН нетоковедущими расходоуемыми заготовками качественные биметаллические соединения можно получать при относительно небольших удалениях наплавляемой поверхности от токоведущей секции ТПК, определяемых режимами наплавки и химическим составом применяемого флюса. При этом необходимо учитывать расположение в шлаковой ванне ее торца относительно наплавляемой поверхности, так как этот параметр оказывает большое влияние на показатели проплавления основного металла.

Список литературы

1. Артамонов В. Л., Сушук-Слюсаренко И. И. (1988) Электрошлаковая наплавка. *Автоматическая сварка*, **11**, 41–46.
2. Бенуа Ф. Ф., Катлер А. И. (1960) Техничко-экономические показатели плавления при автоматической шлаковой сварке пластинчатым электродом. *Там же*, **10**, 19–22.
3. Якушин Б. Ф., Башев Л. Ф. (1982) Исследование процесса электрошлаковой сварки с применением присадочного металла. *Известия вузов*, **7**, 97.
4. Якушин Б. Ф., Башев Л. Ф., Тихонов В. П. и др. (1989) Повышение технологической прочности сварного соединения при электрошлаковой сварке. *Автоматическая сварка*, **10**, 51.
5. Сушук-Слюсаренко И. И., Шабалин Н. Н., Андрианов Г. Г., Лычко И. И. (1974) Некоторые приемы повышения производительности электрошлаковой сварки. *Там же*, **2**, 46–48.
6. Гулида В. П., Семенов В. М., Яковлева Л. И. и др. (1987) Электрошлаковая сварка с дополнительной присадочной проволокой деталей из стали 09Г2С толщиной 60...140 мм. *Сварочное производство*, **2**, 15–18.
7. Буркацкий А. А., Дуркин В. Е., Сушук-Слюсаренко И. И. (1984) Электрошлаковая сварка с дополнительной подачей порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*, **6**, 67.

8. Медовар Б. И., Саенко В. Я., Нагаевский И. Д. и др. (1984) *Электрошлаковая технология в машиностроении*. Киев, Техника.
9. Пономаренко В. П., Стойко В. П., Валиц К. А., Пасечник С. Ю. (1988) Электрошлаковая наплавка с применением плавящихся и неплавящихся электродов. *Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 30–32.
10. Эрмантраут М. М., Малимонов В. И. (1978) Применение неплавящегося электрода при электрошлаковой наплавке. *Сварочное производство*, **7**, 16–18.
11. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А. (2017) Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **2**, 40–45.
12. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В. (2018) Электрошлаковая наплавка торцов заготовок с использованием расходного и нерасходного электродов. *Там же*, **2**, 48–51.
13. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В. (2018) Электрошлаковая наплавка электродом большого сечения на постоянном токе в токоподводящем кристаллизаторе. *Там же*, **3**, 38–42.

References

1. Artamonov, V.L., Sushchuk-Slyusarenko, I.I. (1988) Electroslag surfacing. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 41–46 [in Russian].
2. Benua, F.F., Katler, A.I. (1960) Technical-economic indexes of melting in automatic slag welding with plate electrode. *Ibid.*, **10**, 19–22 [in Russian].
3. Yakushin, B.F., Bashev, L.F. (1982) Study of the electroslag welding with filler metal. *Izv. Vuzov*, **7**, 97 [in Russian].
4. Yakushin, B.F., Bashev, L.F., Tikhonov, V.P. et al. (1989) Improvement of technological strength of welded joint in electroslag welding. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 51 [in Russian].
5. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Shabalin, N.N., Andrianov, G.G. et al. (1974) Some means for improvement of electroslag welding efficiency. *Ibid.*, **2**, 46–48 [in Russian].
6. Gulida, V.P., Semenov, V.M., Yakovleva, L.I. et al. (1987) Electroslag welding with additional filler wire of parts from 09G2S steel of 60–140 mm thickness. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 15–18 [in Russian].
7. Burkatsky, A.A., Durkin, V.E., Sushchuk-Slyusarenko, I.I. (1984) Electroslag welding with additional flux-cored wire feed. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 67 [in Russian].
8. Medovar, B.I., Saenko, V.Ya., Nagaevsky, I.D. et al. (1984) *Electroslag technology in mechanical engineering*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
9. Ponomarenko, V.P., Stojko, V.P., Valits, K.A. et al. (1988) Electroslag surfacing using consumable and nonconsumable electrodes. *Theoretical and technological principles of surfacing. Surfacing in metallurgical and mining industries*. Kiev, PWI, 30–32 [in Russian].
10. Ermantraut, M.M., Malimonov, V.I. (1968) Application of nonconsumable electrode in electroslag surfacing. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 15–18 [in Russian].
11. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Zhdanov, V.A. (2017) Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **12**, 29–32.
12. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Osechkov, P.P. et al. (2018) Electroslag surfacing of billet end faces with application of consumable and nonconsumable electrodes. *Ibid.*, **2**, 38–41.
13. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Osechkov, P.P. et al. (2018) Electroslag surfacing with large-section electrode at direct current in current-supplying mould. *Ibid.*, **3**, 38–42.

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

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

ВИКОРИСТАННЯ НЕСТРУМОВЕДУЧИХ ВИТРАТНИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

При торцевому електрошлаковому наплавленні з використанням неструмоведучих заготовок досліджено вплив видалення наплавлюючої поверхні від струмоведучих секцій струмопідвідного кристалізатора на проплавлення основного металу, продуктивність наплавлення і питому витрату електроенергії. Проведено порівняння впливу на якість біметалу, отриманого при електрошлаковому наплавленні електродами і неструмоведучими заготовками одного і того ж перерізу. Встановлено, що при введенні в шлакову ванну через струмопровідну секцію струмопідвідного кристалізатора оптимальної електричної потужності і використанні плавких заготовок, можна досягти заданого проплавлення основного металу, гарного формування наплавленого шару і продуктивності процесу, порівнянних з тими, що виходять при наплавленні електродом того ж перерізу, тільки в разі оптимального видалення розплавлюючого торця плавлячої заготовки від наплавлюючої поверхні виробу. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: торцеве електрошлакове наплавлення, неструмоведуча витратна заготовка великого перерізу, струмопідвідний кристалізатор, джерела живлення, наплавляюча поверхня, проплавлення основного металу, якість наплавлення

Yu.M. Kuskov, V.G. Soloviov, P.P. Osechkov, V.A. Zhdanov
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.
E-mail: office@paton.kiev.ua

APPLICATION OF NON-CONDUCTING CONSUMABLE BILLETS AT ELECTROSLAG SURFACING IN CURRENT-SUPPLYING MOULD

The effect of increasing the distance from the processed surface to the current-supplying mould on base metal penetration, deposition rate and specific power consumption was studied at electroslag surfacing of end faces with application of non-conducting billets. Comparison of this effect on the quality of bimetal produced in electroslag surfacing with electrodes and non-conducting billets of the same cross-section was performed. It is found that application of optimal electric power to the slag pool through current-conducting section of current-supplying mould and of consumables billets allows achieving the set penetration of base metal, good formation of the deposited layer and process efficiency, commensurate with those obtained at surfacing with electrode of the same cross-section, only in the case of optimum distance from the melted end face of the consumable billet to the processed surface of the item. 13 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: electroslag surfacing of end faces, non-conducting large-section consumable billet, current-supplying mould, power sources, processed surface, base metal penetration, surfacing quality

Поступила в редакцію 15.11.2017

КАЛЕНДАРЬ выставок и конференций в 2018 г.

Дата	Название мероприятия	Место проведения
16–20.04	Выставка «Wire and Tube-2018» (Проволока и трубы-2018)	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, РФ
25–27.04	VIII Специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент»	г. Львов
06–09.05	Международная выставка «IRAN OIL SHOW 2018» с разделами: Металлообработка. Сварка. Труба. Проволока	г. Тегеран, Иран
08–11.05	Эссенская выставка «Сварка и Резка» в Китае	г. ГианЧонг, Китай
22–24.05	26-я Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия - 2018»	г. Запорожье
23–25.05	XVIII Международная научно-техническая конференция «Обеспечение качества при литье и сварке»	г. Тржебнице, Польша
29–31.05	Всероссийская научная конференция «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения»	г. Москва, РФ
01–03.06	XV Международный конгресс производителей ферросплавов	г. Йоханнесбург, ЮАР
05–06.06	Международная выставка лазерной обработки материалов	г. Штутгарт, Германия
07–08.06	Международный балтийский форум DVS и GSI «Мобильность через постоянное обучение и четвертая промышленная революция «Индустрия 4.0»	г. Таллинн, Эстония
11–13.06	Международная конференция «Титан-2018: производство, обработка, применение»	г. Киев
13–14.06	Международная конференция «Наплавка для защиты от износа компонент»	г. Галле, Германия
19–22.06	Международная выставка «АММ 2018 - ASTANA» с разделами: Металлургия. Литье. Металлообработка. Сварка	г. Астана, Казахстан
29.05–01.06	Выставка «Металлоконструкции 2018» с конференцией «Стальные конструкции: оборудование, технологии, рынок»	г. Москва, РФ
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
10–14.09	XXII Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»	г. Одесса
12–13.09	Общероссийская конференция «Проволока – крепеж»	г. Абинск-Геленджик, РФ
17–19.09	IX Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров»	г. С.-Петербург, РФ
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, РФ
22–24.10	Международная конференция «Сварка и неразрушающий контроль»	г. Афины, Греция
13–16.11	Промышленная выставка «МеталлЭкспо 2018»	г. Москва, РФ
20–23.11	XVII Международный промышленный форум–2018 (выставки «Укр-сварка», «Металлообработка» и др.)	г. Киев
30.11–01.12	Конференция «Сварка и термическая обработка мягких живых тканей»	г. Киев
05–06.12	Международная конференция «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее»	г. Киев

Подписано к печати 28.03.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отг. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24.

Печать ООО «ДИА».

03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

КОНКУРС РАБОТ МАЛОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В Донбасской государственной машиностроительной академии (г. Краматорск, Украина) на протяжении двух последних десятилетий стало уже традицией проводить конкурс Малой академии наук Украины (МАН) по секции «Сварочное производство».

Традиционно и в текущем учебном году конкурс проходил в два этапа:

- 1 этап (13.01. 2017 г.) — городской конкурс, в котором принимали участие все желающие;
- 2 этап (17.03.2018 г.) — региональный конкурс, в котором принимали участие не только призёры 1 этапа, но и участники, работы которых вызвали особый интерес жюри.

В городском конкурсе МАН первоначально взяли участие 10 работ, а после отсева на второй этап вышло из них 5. Ранее в конкурсе принимали участие только школьники. А уже в этом году удалось расширить круг конкурсантов за счет привлечения студентов третьего и четвертого курсов Дружковского техникума (ДТ) ДГМА (одного из подразделений академии).

Проведение данного мероприятия позволяет привлечь наиболее талантливую молодежь к научно-исследовательской работе (НИР) и частично решить проблему с набором абитуриентов на специализацию «Технологии и оборудование сварки». Школьники, занимающиеся НИР, являются учащимися 10-х и 11-х классов, а учащиеся техникума — студентами 3-го и 4-го курсов среднеспециального учебного заведения.

Хотелось бы отметить, что, начиная с 2016 учебного года, существует практика проведения в стенах академии лабораторных работ по некоторым из основных дисциплин, входящих в программу подготовки младших специалистов, что позволяет студентам техникума широко использовать материально-техническую базу кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства» («ОиТСП») ДГМА не только в учебном процессе, но и при проведении ими НИР.

Общеизвестно, что в последние десятилетия технические специальности не пользуются такой популярностью как в прежние годы. Это касается, к сожалению, и направления «Сварка и родственные процессы и технологии». Проведение данного конкурса не только позволяет привлечь талантливую молодежь к науке, но и популяризирует специальность. Так, по статистическим данным, полученным нашей кафедрой, 90 % выпускников, прошедших подготовку в МАН, выбирают в дальнейшем, при поступлении в вузы Украины и зарубежья, только технические специальности, а 95 % победителей регионального конкурса — специальность по направлению «Сварочное производство» (при этом, при-



Конкурсная комиссия и участники конкурса секции «Сварочное производство» МАН. Слева направо: Журавель Д. В., Халюта А. Э., Коробов В. А., Кошевой А. Д., Макаренко Н. А., Агеева М. В., Куший А. М., Безродный В. Л.

зёры поступают не только в ДГМА, но и в другие учебные заведения страны).

В 2018 г. были привлечены к проведению конкурса МАН высококвалифицированные профессорско-преподавательские кадры кафедры «ОиТСП» ДГМА: председатель жюри — д.т.н., проф. Макаренко Н.А.; председатель секции — к.т.н., ст. преп. Куший А.М.; члены жюри — к.т.н., доцент Кошевой А.Д., к.т.н., ст. преп. Голуб Д.М.

Особый интерес представила тема НИР «Сварка пластиковых труб», выбранная участником конкурса, ставшим впоследствии победителем. Данная тема особенно актуальна, так как в настоящее время изделия из пластмассы широко применяются в быту, в частности, при монтаже систем водопровода, канализации и отопления.

В этом году по общим результатам двух туров МАН победителями были признаны:

– 1-е место занял Халюта Андрей Эдуардович, студент 3 курса ДТ ДГМА (тема исследований «Сварка пластиковых труб», руководитель Безродный В. Л.);

– 2-е место разделили между собой Коробов Владислав Александрович, студент 3 курса ДТ ДГМА (тема исследований «Технология гидроабразивной резки», руководитель Безродный В.Л.) и Журавель Дмитрий Витальевич, студент 3 курса ДТ ДГМА (тема исследований «Оборудование для гидроабразивной резки», руководитель Безродный В. Л.).

Работы участников были представлены в виде презентаций, выполненных в пакетном приложении PowerPoint, с использованием современного демонстрационного оборудования (в частности, мультимедийной доски Dual Board и мультимедийного проектора LEATER). Доклады проходили с демонстрированием наглядных пособий и опытных образцов, изготовленных непосредственно самими конкурсантами.

Подготовили: Н. А. Макаренко, А. М. Куший

ПОСЕЩЕНИЕ ИЭС СПЕЦИАЛИСТАМИ ЛАНЬЧЖОУСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА (КНР)

В период с 18 до 25 марта 2018 г. в соответствии с официальным приглашением руководства ИЭС делегация специалистов-сварщиков Ланьчжоуского технологического университета (ЛТУ), а также предприятия Ланьши посетила ИЭС. Это уже повторный визит, последовавший после посещения ИЭС ранее руководством ЛТУ. В состав делегации вошли известные в Китае ученые в области сварки д-р Юй Ши и д-р Дин Фань.

В начале встречи заместитель директора Института академик НАНУ Л. М. Лобанов ознакомил гостей с историей, достижениями и основными направлениями деятельности ИЭС им. Е. О. Патона. Затем делегация посетила демонстрационный зал Института, где ознакомилась с основными направлениями научно-исследовательских работ Института и результатами практического их использования.

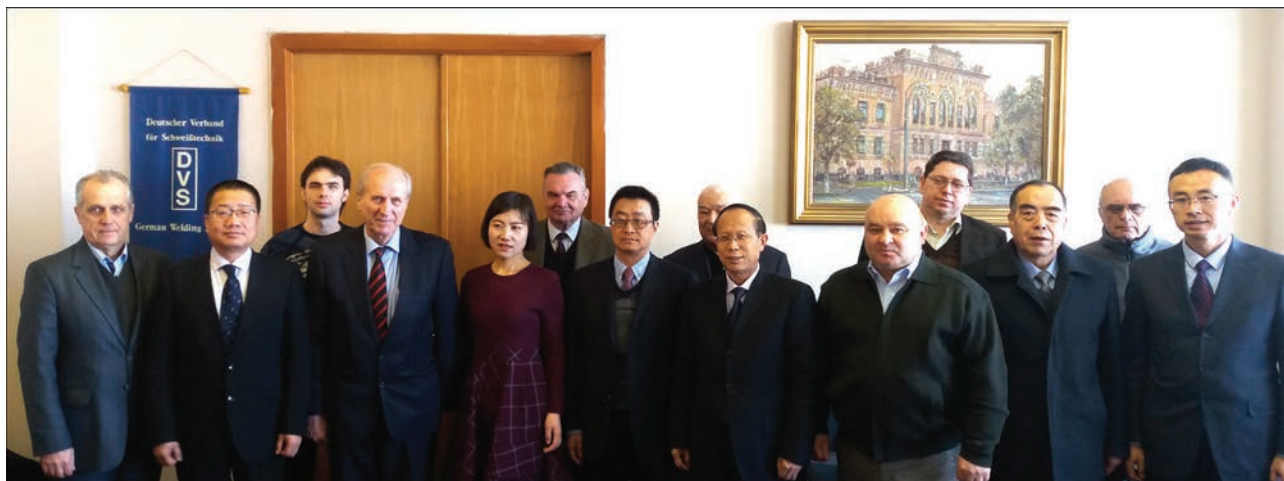
– разработка и создание автоматизированных экспертных систем для технической диагностики нагруженных деталей, объектов и конструкций (руководитель работ — А. Я. Недосека);

– математическое моделирование в области оценки остаточного ресурса сварных конструкций, работающих в условиях статических и динамических нагрузок (руководитель работ — О. В. Махненко);

– разработка новых сварочных материалов (руководитель работ — В. В. Головкин);

– разработка технологий плазменной сварки, гибридных и комбинированных процессов, а также плазменной резки (руководитель работ — В. Н. Коржик);

– разработка оборудования и технологий сварки живых тканей (руководитель работ — Г. С. Маринский).



Во время встречи в ИЭС им. Е. О. Патона

Далее специалистам Китая была предложена обширная программа более глубокого знакомства с научно-практической деятельностью Института по отдельным направлениям. Были заслушаны презентации по таким направлениям:

– разработка, математическое моделирование и применение высокоэффективных процессов активированной ТИГ и плазменной сварки, включая сварку по слою активированного флюса и сварку с высокочастотной модуляцией сварочного тока программными импульсами. Была проведена демонстрация оборудования и технологий сварки (руководитель работ — И. В. Кривцун);

– разработка и применение высокоэффективных процессов сварки титановых сплавов, включая сварку в узкий зазор (руководитель работ — С. В. Ахонин);

– разработка оборудования и технологий детонационного напыления (руководитель работ — Ю. Н. Тюрин);

Китайским специалистам была представлена информация об издательской деятельности ИЭС им. Е. О. Патона, с которой участников встречи ознакомил А. Т. Зельниченко.

На итоговой встрече со специалистами КНР была проведена заключительная беседа с участием заместителя директора академика НАНУ И. В. Кривцуна, на которой присутствовали также руководители работ по направлениям. В результате проведенных совместных обсуждений был подписан Протокол о посещении ИЭС им. Е. О. Патона специалистами КНР, а также Соглашение о совместном сотрудничестве (обмен специалистами; проведение совместных научно-исследовательских проектов; поиск китайской стороной заказчиков и сопровождение внедряемых разработок ИЭС на промышленных предприятиях Китая).

По приглашению китайской стороны в октябре 2018 г. делегация специалистов ИЭС им. Е. О. Патона посетит Ланьчжоуский технологический университет.

Д. В. Коваленко

Методика оценки состояния металла сварного корпуса реактора ВВЭР-1000

Корпус реактора является сварной конструкцией. Безопасная эксплуатация реакторной установки зависит от многих факторов и определяется, главным образом, надежностью корпуса реактора (КР), который должен сохранять целостность при нормальной эксплуатации, нарушении условий эксплуатации и при проектных авариях.

Воздействие эксплуатационных факторов (нейтронного облучения, повышенной температуры, циклического нагружения) на металл КР (основной металл и металл сварных швов) приводит к изменению свойств металла — прежде всего, к снижению сопротивления хрупкому разрушению, поэтому данные о развитии процесса радиационного охрупчивания металла КР являются важными с точки зрения безопасной эксплуатации АЭС.

Контроль состояния металла КР осуществляется путем испытаний неразрушающими и разрушающими методами образцов-свидетелей (ОС), устанавливаемых в реактор. Результаты испытаний ОС являются представительными для оценки свойств металла КР только в том случае, если с необходимой точностью известны условия облучения образцов в реакторе и самого КР, что требует осуществления тщательной дозиметрии нейтронного облучения.

Результаты испытаний ОС являются основным источником информации о состоянии металла КР. С помощью образцов-свидетелей контролируется изменение механических свойств и характеристик сопротивления хрупкому разрушению. Эта информация необходима для обоснования ресурса безопасной работы атомного энергоблока.

Основные материалы

В атомной энергетике Украины эксплуатируются 13 реакторных установок типа ВВЭР–1000. Номинальная тепловая мощность реактора 3000 МВт, давление рабочей среды (борированной воды) на выходе из активной зоны 160 кгс/см², температура 320 °С, расход теплоносителя 84000 м³/ч. Корпусы реакторов ВВЭР-1000 изготавливаются из малоуглеродистой низколегированной стали ферритно-перлитного класса хромо-никель-молибден-ванадиевой композиции. Применявшаяся ранее для корпусов реакторов ВВЭР-440 безникелевая сталь 15Х2МФА для изготовления КР ВВЭР-1000 не годилась по прочностным и технологическим свойствам. В частности, было необходимо снизить температуры предварительного и сопутствующего подогрева при сварке, а также исключить немедленный отпуск после завершения сварочных работ с учетом возможности некоторого понижения температуры отпуска. В связи с этим, корпуса реакторов ВВЭР-1000 изготавливаются из стали марки 15Х2НМФА. Для изготовления верхней и нижней обечаек, находящихся напротив активной зоны, используется сталь той же композиции 15Х2НМФА-А, но с более жесткими требованиями по содержанию вредных примесей (фосфора, меди и серы).

Корпус реактора состоит из 7 обечаек, сваренных между собой кольцевыми швами. Для каждого элемента КР отливается слиток определенного развеса, из которого изготавливается соответствующая поковка. Вес поковок для КР ВВЭР-1000 составляет от 70 до 115 т. Толстостенные обечайки изготавливают из слитков на гидравлических прессах. Эллипсоидный сегмент для днища делают методом штамповки. Поковки для КР подвергают закалке и отпуску. После проведения полной термической обработки исходных заготовок от каждой из них отрезается проба для механических и технологических испытаний. Затем заготовки подвергаются предварительной механической обработке и подготовке кромок под сварку кольцевых швов.

Сварочные материалы

При изготовлении КР ВВЭР-1000 для сварки кольцевых швов используются различные сварочные материалы — проволока Св-08ХГНМТА с флюсом 48НФ-18М или проволока Св-10ХГНМАА и Св-12Х-2Н2МАА с флюсом ФЦ-16А. Поскольку использование этих материалов было разрешено действующей нормативной документацией, то заводы-изготовители (Ижорский и Атоммаш) сварку кольцевых швов на одном и том же типе КР выполняли по различным технологическим вариантам. Позже для снижения коэффициента радиационного охрупчивания было принято решение отказаться от использования для сварных швов, расположенных напротив активной зоны, сварочных материалов с содержанием никеля более 1,5 %. Однако для энергоблоков АЭС Украины это уже не имело значения, поскольку корпуса реакторов были изготовлены ранее.

По окончании процесса сварки каждого кольцевого шва производится термическая обработка по режиму высокого отпуска. Антикоррозионная наплавка осуществляется автоматической свар-

кой ленточным электродом марки Св-07Х25Н13 (первый слой) и Св-08Х19Н10Г2Б (второй и третий слой) под слоем флюса изнутри при вращении КР на специальном кантователе. Эта операция также требует последующей термообработки (дополнительного отпуска), поэтому отпуск после сварки производится совместно с отпуском после наплавки.

Изготовление образцов-свидетелей

ОС основного металла (ОМ) КР изготавливаются на заводе-изготовителе корпусов реакторов из припусков одной из обечаек, находящихся против активной зоны, для которой содержание вредных примесей по сумме ($10P+Cu$) является наибольшим, а в случае равенства этого показателя — из обечайки, для которой содержание мышьяка, сурьмы и олова ($As+Sb+Sn$) является наибольшим.

ОС металла сварного шва (МШ) и зоны термического влияния (ЗТВ) изготавливаются из производственного контрольного сварного соединения, выполненного при той же разделке, при тех же режимах и способах сварки, с применением сварочных материалов той же партии, что и сварные соединения обечаек КР, расположенные в районе активной зоны, прошедшего комплекс термических обработок, как и КР.

В соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002 и ПНАЭ Г-7-008 контроль изменения свойств ОМ, МШ и ЗТВ предусмотрен на образцах Шарпи, Шарпи с трещиной и образцах на растяжение, а именно:

- пропорциональные десятикратные цилиндрические образцы с диаметром в рабочей части 3 мм для испытаний на растяжение (Р);
- образцы для испытаний на ударный изгиб типа II по ГОСТ 9454 для ОМ и типа IX по ГОСТ 6996 для МШ и ЗТВ (образцы Шарпи) (Ш);
- образцы для определения трещиностойкости типа COD (Шарпи с трещиной) (С).

Образцы-свидетели помещаются в герметичные контейнеры, изготовленные из нержавеющей стали 08Х18Н10Т. Теплоотвод от ОС, нагреваемых нейтронным потоком и гамма-облучением, обеспечивается с помощью заполнителей и прокладок из алюминия или алюминиевых сплавов. В настоящее время используются два вида контейнеров. Штатный — цилиндрический контейнер с толстыми стенками, выдерживающими без деформации давление рабочей среды. Такие контейнеры поставляются заводом-изготовителем в комплекте с КР. Основным недостатком штатных контейнерных сборок (КС) с цилиндрическими контейнерами — большой разброс величины флюенса нейтронов на рабочие части ОС из-за значительного градиента нейтронного потока по периметру и высоте штатных КС. В модернизированных программах целесообразно использовать плоские контейнеры, которые позволяют при оптимальной ориентации КС существенно уменьшить градиент нейтронного потока на рабочие части ОС, облучаемые в одном контейнере.

На всех энергоблоках ВВЭР-1000 АЭС Украины контейнерные сборки с облучаемыми ОС устанавливаются в пространство между верхним торцом выгородки и нижним торцом блока защитных труб в специальные трубы, приваренные к верхнему торцу выгородки. Контейнеры с ОС компонуются в контейнерные сборки, которые устанавливаются на верхнем и нижнем ярусах.

Результаты испытаний ОС являются представительными для оценки свойств металла КР только в том случае, если с необходимой точностью известны условия облучения образцов в реакторе и самого КР. Для определения условий облучения ОС (флюенса быстрых нейтронов с энергией $E \geq 0,5$ МэВ и температуры облучения) в контейнеры с ОС устанавливаются нейтронно-активационные индикаторы (НАИ) и индикаторы температуры облучения (ИТО). НАИ представляют собой фольги (тонкие диски) или проволоки из металлов (химически чистые железо, ниобий, медь), которые помещаются в капсулу из алюминиевого сплава. В качестве ИТО применяются индикаторы на основе алмазного порошка и плавкие мониторы температуры на основе легкоплавких эвтектик с температурой плавления, близкой к температуре теплоносителя. Индикаторы размещаются в отверстиях, выполненных в ОС или в заполнителях.

Расположение контейнеров с ОС в КС обеспечивает облучение контейнеров верхнего яруса нейтронным потоком, приблизительно равным нейтронному потоку на внутреннюю поверхность КР, а нижнего — нейтронным потоком приблизительно в 2,5 раза большим, что позволяет определять свойства металла на текущий момент и на прогнозный период до очередной выгрузки топлива.

Сроки извлечения комплектов образцов-свидетелей определяются по результатам исследований образцов предыдущих комплектов ОС, анализа накопленного флюенса быстрых нейтронов на внутренней поверхности КР с начала эксплуатации и величины критической температуры хрупкости на прогнозный период. Оценка результатов исследований ОС выполняется путем сравнения

полученных при испытаниях ОС прогнозных свойств материалов КР с предельно допустимыми значениями, установленными в проектной документации КР. По результатам такого сравнения делается вывод о возможности безопасной эксплуатации КР до выгрузки и испытания следующего комплекта ОС или о необходимости проведения компенсирующих мероприятий в случае, если ожидается, что в течение периода времени, на который сделан прогноз, контролируемые значения свойств основного металла и металла швов выйдут за безопасные пределы.

В случае аварийной остановки реактора и заполнения его холодной водой (при термошоке) в КР возникают значительные напряжения. Состояние металла КР оценивается главным образом критической температурой хрупкости T_K , при которой обеспечивается целостность корпуса. В ряде случаев для исключения хрупкого разрушения используют постоянный подогрев емкости с водой до температуры выше критической.

Если в процессе эксплуатации реактора обнаружится, что КР охрупчивается более интенсивно, чем металл других аналогичных корпусов, то можно или снизить нейтронный поток в заданной точке КР за счет, например, изменения схемы загрузки топлива, или провести специальную термическую обработку корпуса («отжиг»). В этом случае для нагрева используется мощный программируемый источник тепла (обычно на основе электрических нагревателей и ламп накаливания). Корпус медленно нагревается приблизительно до 500 °С, выдерживается при этой температуре не менее 20...40 ч и затем медленно охлаждается. Время нагрева и охлаждения не менее 4...20 ч, максимальная температура нагрева определяется прочностью бетона и конструкций опорных элементов реактора. Скорость охлаждения обычно ниже, чем при нагреве, в том числе для уменьшения напряжений в антикоррозионной внутренней наплавке корпуса.

При облучении металла потоком нейтронов в кристаллической решетке образуются дефекты. Величина дефектов зависит от энергии движущегося нейтрона. При распаде ядер урана выделяются нейтроны с широким энергетическим спектром. При отжиге металла за счет энергии нагрева дефекты кристаллической решетки аннигилируют («растворяются»), а энергетический спектр атомов решетки сравнительно узок и определяется температурой нагрева металла. Очевидно, что вероятность аннигиляции выше у небольших дефектов, образованных нейтронами с невысокой энергией. Следовательно, в решетке при нагреве наиболее интенсивно растворяются низкоэнергетические дефекты, а дефекты от нейтронов с высокой энергией сохраняются. Таким образом, отжиг очищает решетку в основном от низкоэнергетических дефектов. При этом общая плотность дефектов снижается и увеличиваются показатели пластичности металла.

Эффект снижения хрупкости в результате отжига может оказаться сравнительно кратковременным. При указанных выше параметрах отжига сопротивление хрупкому разрушению не восстанавливается полностью до исходного состояния необлученного металла. С системной точки зрения в процессе эксплуатации реактора отжиг является сравнительно кратковременным возмущением и система постепенно возвращается в обычное состояние.

Отметим, что нагрев металла в процессе отжига способствует также снижению концентрации атомов вредных примесей, в частности, фосфора на границах зерен и увеличивает сопротивляемость металла хрупкому разрушению.

Определенные трудности при контроле свойств корпуса реактора могут быть связаны с недостаточным количеством ОС, в частности, для дублирования измерений при оценке текущего и накопленного флюенса быстрых нейтронов. В этом случае можно использовать метод реконструкции образцов. Заключается он в следующем. К обломкам (половинкам) облученных образцов после испытаний на ударный и трехточечный статический изгиб приваривают хвостовики, обрезают их по требуемому размеру и в середине полученного образца наносят соответствующий надрез. В результате получаем образец с надрезом в рабочей части из облученного материала. Основное требование к сварке — минимальная энергия сварки, чтобы избежать нагрева образца и искажения его свойств. Обычно используют электронно-лучевую сварку.

В целом, принятая система контроля свойств металла корпуса реактора и его швов позволяет с приемлемой точностью и надежностью оценивать и прогнозировать их свойства. Определенным недостатком является расположение ОС в реакторе. Логичнее было бы разместить их на внутренней стенке корпуса, однако это связано с изменением конструкции и размеров корпуса реактора.

О. Г. Касаткин

Сварка циркония и его сплавов

Цирконий и его основной сплав циркалой обладают физическими свойствами, которые не имеют большинство других металлических материалов. Комбинация механической прочности, коррозионной стойкости и высокой термостабильности делает их привлекательными для использования в таких разнообразных секторах, как биохимическая, ядерная, аэрокосмическая и нефтехимическая промышленность.



Изделия из циркониевого сплава, сваренные в защитной среде инертного газа (шов не обезцвечивается)

Более конкретно, циркалой используется при производстве сосудов высокого давления и теплообменников. Сплав характеризуется отличной устойчивостью к большинству органических и неорганических кислот, солевых растворов, сильных щелочей и некоторых расплавленных солей, и эти свойства делают его пригодным для использования в насосах, где преимущество, связанное с коррозионной стойкостью, является обязательным. Циркониевые сплавы являются биосовместимыми и поэтому могут использоваться для имплантатов: сплав Zr–2,5Nb используется в имплантатах колена и бедра.

Безусловно, наиболее значительны применения циркония и его сплавов на атомных электростанциях. Циркониевые сплавы широко используются при производстве топливных стержней, особенно в реакторах с водой под давлением.

Подготовка к сварке

Цирконий очень чувствителен к загрязнению активными газами, такими как кислород, азот и водород, и абсорбция этих материалов может оказать значительное влияние на механические, химические и тепловые свойства. Проволоку, используемую для соединения, необходимо тщательно очистить и не допускать наличие посторонних материалов в зоне сварки. Металлические поверхности в зоне соединения должны быть защищены инертным газом до тех пор, пока металл шва и прилегающие участки не остынут от температуры плавления 1835 °C до температуры ниже 315 °C.

Для сварки циркония используются процессы электронного пучка (EBW) и газовой вольфрамовой дуги (GTAW). EBW проводится в вакууме, поэтому потребность в защите окружающей среды не требуется. Аргон для сварки (чистота 99,999 %), необходим для защиты во время GTAW, а также для очистки. Аргон обеспечивает отличную стабильность дуги и поскольку он тяжелее воздуха, покрывает сварной шов и обеспечивает защиту. Аргон и смесь аргон+гелий также могут использоваться для защиты при сварке и продувке, в которой низкая плотность гелия может

эффективно защищать малодоступные зоны. Точка росы газа должна быть не более -51°C .

При сварке циркония и его сплавов могут быть использованы все традиционные сварочные процессы. Однако важно обеспечить высокую чистоту процесса, чтобы загрязнения не возникали — сплавы циркония могут быть особенно восприимчивы к растрескиванию и пористости, если сварочная среда не контролируется должным образом.

Перед сваркой необходима механическая обработка или интенсивная очистка с последующим тщательным обезжириванием зоны соединения подходящим растворителем, при этом сама сварка происходит в течение последующих примерно восьми часов, чтобы снизить риск загрязнения.

Присутствие азота в защитном газе может привести к пористости, поэтому необходимо соблюдать осторожность, чтобы обеспечить достаточную защиту зоны сварки. При выполнении прочноплотных швов чистота газа и эффективность газовой защиты требуют тщательного контроля. Газовые шланги следует проверять на наличие повреждений и утечек через регулярные промежутки времени. Рекомендуются газовые линзы для равномерного истечения защитного газа.

Само собой разумеется, что подача защитного газа необходима и при выполнении корневого прохода GTAW. Некачественная защита может привести не только к появлению включений в наплавленном металле, но и к снижению коррозионной стойкости, если оставить его на открытых поверхностях. Очистка после сварки для удаления этих нежелательных загрязнений может занять много времени и потребовать дополнительных затрат.

Управление очисткой газа

Широкий спектр вспомогательного оборудования доступен специально для обеспечения оптимального покрытия зоны сварки инертным защитным газом. Он включает диапазон от простых расширяемых пробок до полностью интегрированных надувных систем, вмещающих, например, зоны соединения труб диаметром от 10 до 2500 мм.

Механические заглушки могут использоваться для продувки трубопроводов, где присутствуют различные отверстия и где легче очистить всю сборку.

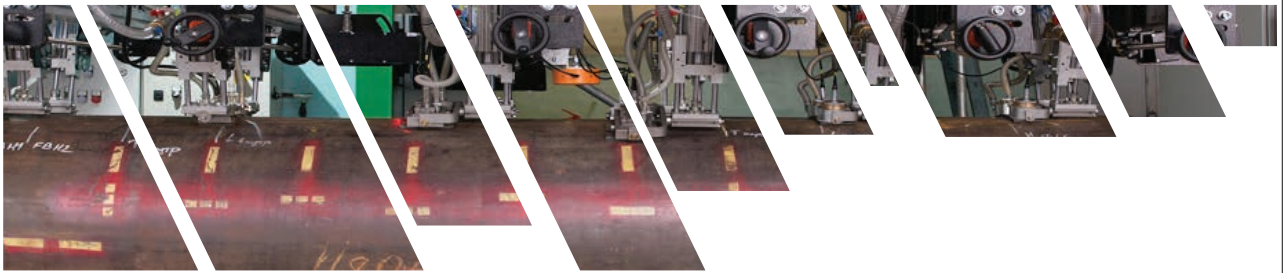
Революционный ассортимент PurgElite®, изготовленный Huntingdon Fusion Techniques, представляет собой прочное, удобное в использовании вспомогательное сварочное оборудование, которое обеспечивает значительную экономию времени и расход инертного газа.



Надувная система для защиты зоны сварки



По материалам пост-релиза компании
Huntingdon Fusion Techniques



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



XXII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

10–14 вересня 2018

Одеса, Аркадія, готель «Курортний»

Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України

Генеральний спонсор
ПрАТ «УкрНДІНК»



Спонсори



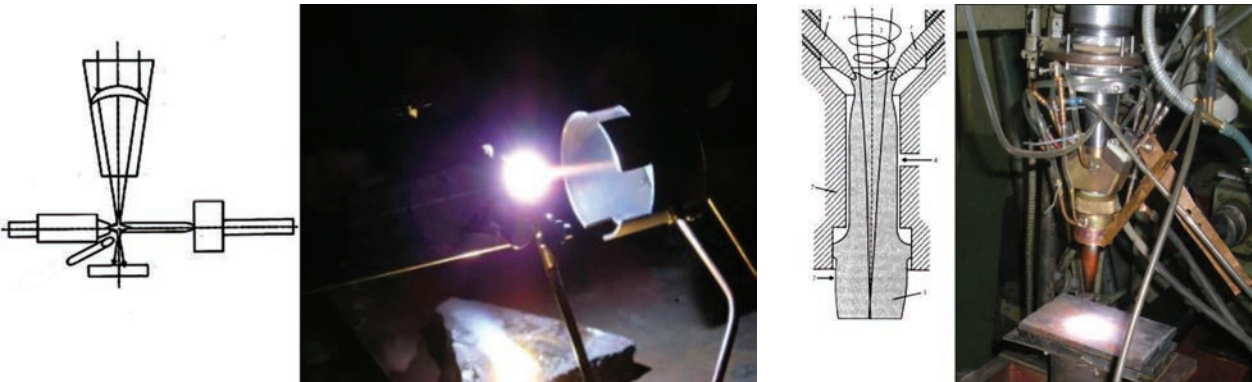
ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

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

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

ГИБРИДНОЕ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ АЛМАЗНЫХ И АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

СХЕМЫ ПРОЦЕССА

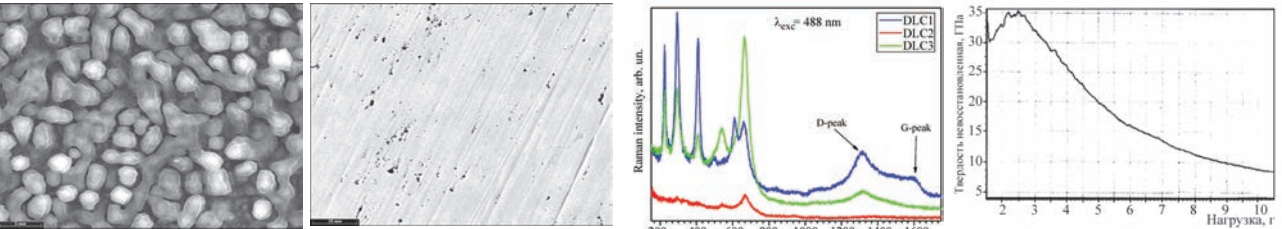


Перекрестное взаимодействие плазменной струи с лазерным излучением: CO₂-лазер (2 кВт), плазматрон МП-03 (2 кВт)

Коаксиальное взаимодействие плазменной струи с лазерным излучением: CO₂-лазер (2 кВт), плазматрон ИЛДП-01 (2 кВт)

Параметры процессов

Вид покрытия	Продолжительность обработки, мин	Дистанция обработки, мм	Рабочий газ (состав, расход, л/мин)	Материал основы	Температура основы, °С
Алмазное	5...15	40...75	9Н ₂ +5СН ₄ 0,8...2,3	Мо, Si	60...90
Алмазоподобное	7...15	50...180	9Н ₂ +5СН ₄ 0,6...1,4	Сталь 45, титановый сплав	100...250



Алмазное покрытие на молибденовой основе

Алмазоподобное покрытие на стали

Рамановская спектроскопия алмазоподобных покрытий

Твердость алмазоподобных покрытий на сталь 45 при T < 250 °С, Δ_{покр} = 0,5...0,7 мкм

СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

- Толщина покрытия, мкм — 0,3...3
- Твердость, ГПа:
 - на поверхности стали — 12...35 (твердость основы составляет 2,0...2,6)
 - на поверхности титанового сплава — 15...30
- Скорость осаждения, мкм/ч — 2...25

РЕЗУЛЬТАТЫ

- ♦ разработана физико-математическая модель плазменной струи, которая генерируется интегрированным лазерно-дуговым плазматроном;
- ♦ разработан интегрированный лазерно-дуговой плазматрон ИЛДП-01 мощностью до 5 кВт для нанесения покрытий;
- ♦ исследован процесс лазерно-плазменного нанесения покрытий в условиях перекрестного и коаксиального взаимодействия плазменной струи с лазерным лучом;
- ♦ исследованы условия формирования алмазных и алмазоподобных покрытий;
- ♦ исследована структура алмазных покрытий на основах из Мо, Si и структура и свойства алмазоподобных покрытий на основах из стали 45 и титанового сплава.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Календарь апреля

1 апреля 1939

Спущен на воду «Тирпиц» (нем. Tirpitz) — второй линкор типа «Бисмарк», входивший в состав Кригсмарине (Германия). В боевых действиях практически не участвовал, однако своим присутствием в Норвегии угрожал арктическим конвоям в СССР и сковывал значительные силы британского флота. Этот линкор отличался большим объемом применения сварки при его строительстве. Примерно на 90...95 % корпус корабля был сварным. Это позволило существенно уменьшить вес корабля по сравнению с использованием заклепок и это, в свою очередь, позволило создать более мощную броневую защиту.



2 апреля 1924



Родился Анатолий Сидорович Демьянчук (1924–1990) — представитель Патоновской школы. Благодаря изобретенному и созданному под его руководством высокочастотному генератору конденсированной искры с ударным возбуждением разработаны оригинальные методики спектрального анализа различных сталей, металла сварных соединений, композиционных материалов и диффузных покрытий. Методика успешно внедрена в практику спектральных лабораторий НИИ и ЦЗЛ заводов. А. С. Демьянчук — автор около 100 научных работ.

3 апреля 1984



В 1984 г. Ракеш Шарма в составе интернационального космического экипажа на разработанном в ИЭС им. Е. О. Патона приборе для нанесения покрытий «Испаритель-М» провел эксперимент «Переохлаждение». Ракеш Шарма — первый индийский космонавт и 138-й человек в мире, совершивший полет в космос. В ходе эксперимента производилась плавка и затвердевание свободно перемещающихся в невесомости и вакууме сферических отливок. Эти эксперименты имели важное значение для развития сварочных технологий в условиях космоса.

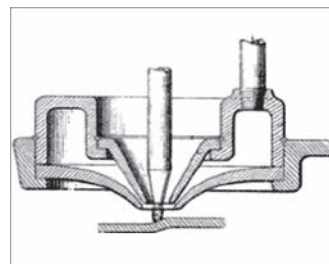
4 апреля 1973

Закончилось строительство всемирного торгового центра в Нью-Йорке, на возведение которого использовано 139500 кг наплавленного металла при сварке. Комплекс из семи зданий спроектирован архитектором Минору Ямасаки. Архитектурной доминантой комплекса были две башни, каждая по 110 этажей — Северная (высотой 417 м) и Южная (высотой 415 м). Проект зданий представляет собой структурную систему «труба-каркас», которая использовалась в башнях-близнецах. Принцип «труба-каркас» был новым подходом, который позволил увеличить пространство полезных площадей, в отличие от традиционного дизайна (башни были разрушены 11 сентября 2001 г. во время террористической атаки).



5 апреля 1927 (дата публикации)

Плазменная горелка или плазмотрон представляет собой электрод, подключенный к источнику тока и окруженный соплом с каналом сравнительно малого диаметра. Второй потенциал источника подключается к соплу горелки или к изделию. В 1921 г. американский изобретатель Химес применил горелку такой конструкции для резки металлов, добившись высокой концентрации теплоты, мощного напора газа и хорошего качества реза. Именно с этого момента начинается история плазменной сварки. Горелка Химеса являлась прообразом современных плазмотронов. Сам термин «плазма» ввел ученый Ирвинг Ленгмюр (1881–1957).



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

6 апреля 1890

Родился Антон Герман Герард (Энтони) Фоккер (1890–1939) — нидерландский авиаконструктор. В 1913 г. Фоккер основал близ Шверина (Германия) авиационный завод. Во время Первой мировой войны Энтони Фоккер начал использовать сварку в производстве фюзеляжей немецких истребителей. Свой первый полет усовершенствованный самолет «Фоккер Е.1» совершил весной 1914 г., а через год он уже выпускался серийно и широко применялся на фронтах. В 1920-е годы Энтони Фоккер переехал в США, где основал отделение своей фирмы. Компания Фоккера стала одним из ведущих производителей гражданских самолетов в мире. В 1926 г. на одном из самолетов Фоккера был осуществлен перелет через Северный полюс.

7 апреля 1947

Скончался Генри Форд (1863–1947) — американский промышленник, владелец заводов по производству автомобилей по всему миру, автор 161 патента США. Генри Форд организовал массовое производство автомобилей на конвейере, ориентировался на применение контактной, дуговой и газовой сварки вместо кузнечной сварки и клепки. Конструкции шасси, кузовов, выхлопных труб, баков и ряда других узлов и деталей сразу проектировали с учетом технологических возможностей сварки. Шасси в виде рамной конструкции первое время сваривали ацетиленокислородным пламенем, затем дугой плавящегося электрода. Значительная часть соединений приходилась на контактную стыковую, шовную и точечную сварку.

8 апреля 1919

Родился Юзеф Николаевич Готальский (1919–2002) — известный ученый, представитель Патоновской школы. Результаты научных работ Ю. Н. Готальского позволили создать материалы для сварки разнородных сталей, которые и теперь находят широкое применение. С их использованием реализуется принципиально новая технология сварки, а именно, без подогрева и термообработки труб для нефтехимической и электроэнергетической промышленности. В КНР при участии Ю. Н. Готальского уже к концу 1959 г. электрошлаковую сварку применяли при изготовлении ковочных штампов, паровых котлов, прокатного и другого оборудования. Ю. Н. Готальский автор 2 монографий, свыше 130 статей и авторских свидетельств.

9 апреля 1939

Родился Борис Васильевич Данильченко — представитель Патоновской школы, один из разработчиков технологии дуговой износостойкой наплавки листов порошковыми лентами. Им лично и в соавторстве разработана и доведена до промышленного производства серия материалов для наплавки специальных сталей и сплавов, нанесения защитных термopокрытий, создан ряд технологий наплавки различных промышленных деталей. В. Д. Данильченко автор и соавтор около 130 научных работ и более 40 авторских свидетельств.

10 апреля 1870

Родился Макс Ульрих Шооп (1870–1956) — создатель метода термического напыления металла (металлизации). Этот процесс является родственной сварке. Сварка соединяет металлические элементы, а газотермическое напыление защищает поверхности от коррозии, износа и т. д. Первая установка Шооп переносила жидкий свинец с помощью водяного пара. В 1913 г. Ульрих Шооп усовершенствовал и запатентовал конструкцию газопламенного распылителя, где материал для распыления подавался в пламя газовой горелки в виде проволоки. Благодаря значимому вкладу в начальное развитие технологий, методы нанесения газотермических покрытий путем распыления стали называть шоопированием, по имени изобретателя технологии.



11 апреля 1925

Родился Степан Иванович Семергеев (1925–1999) — представитель Патоновской школы. Занимался исследованием процесса шовной конденсаторной сварки, разработкой технологии и оборудования для использования этого способа на предприятиях различных отраслей промышленности. С. И. Семергеевым исследованы зависимости параметров режимов от толщины и теплофизических свойств материалов, в частности, химически активных и тугоплавких сплавов в одно- и разнородном соединениях. Им разработаны технологические процессы сварки рулонированных материалов в металлургическом производстве, герметизации чувствительных элементов и электровакуумных приборов в приборостроении и радиоэлектронике.

12 апреля 1962

Умер Антуан (Нота Беркович) Певзнер (1884–1962) — русский и французский художник и скульптор. В 1911 г. приехал в Париж, где познакомился с А. П. Архипенко (1887–1964) и А. Модильяни (1884–1920). Развивая идеи конструктивизма, пришел к кинетическому искусству. Студия Певзнера была на окраине Парижа, где и находятся его скульптуры. Он был одним из первых художников, который воспользовался паяльной лампой при создании скульптуры, сваркой медной кантани на скульптурной форме, выработал ряд методов, которые можно использовать при сварке в процессе создания скульптурных форм.

**13 апреля 1961**

Родился Азриль Моисеевич Бейниш (1911–1997) — представитель Патоновской школы. При его активном участии разработаны высокопроизводительные электроды с железным порошком в покрытии марки АНО-1, низководородные электроды АНП-6П и АНО-31, технологии промышленного производства электродов и применения их на вагоностроительных заводах Нижнего Тагила и Кременчуга.

14 апреля 1929

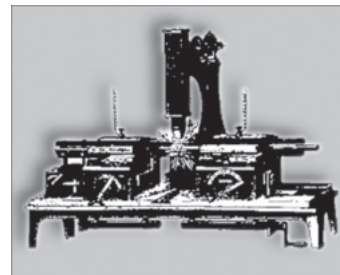
В Киеве при Всеукраинской академии наук академик Евгений Оскарович Патон основал сварочную лабораторию. Имея значительный опыт, он разработал комплексную программу исследований в направлении создания материалов и оборудования, перспективных способов и технологий сварки ответственных инженерных сооружений. Первые же исследования лаборатории вызвали интерес как в СССР, так и за рубежом. В 1930 г. Е. О. Патон организовал Электросварочный комитет — общественную организацию, основной задачей которой была координация работ предприятий и учреждений, занимающихся сварочным производством.

15 апреля 1939

Родился Леонид Александрович Семенов (1939–2013) — представитель Патоновской школы. При его непосредственном участии выполнен комплекс научно-исследовательских и технологических работ в области контактной стыковой сварки алюминиевых сплавов. Созданы и успешно внедрены на предприятиях министерств авиационной промышленности, оборонной промышленности и общего машиностроения бывшего СССР технологии и оборудование для сварки силовых элементов (шпангоутов и обечаек) корпусов летательных аппаратов. Занимался разработкой технологии сварки новых узлов и деталей корпусов ракетополетителей «Зенит», «Циклон-4».

16 апреля 1889 (сообщение)

Предложено принципиально новое взаимное расположение электродов, свариваемого изделия и дуги. Менеджер компании «Американ электрик» Ч. А. Коффин запатентовал роликовый металлический электрод, перемещающийся над поверхностью изделия на изолированной от него каретке. Дуга возбуждалась между вращающимся роликовым электродом (положительный потенциал) и изделием, подключенным к отрицательному потенциалу. Такую же каретку Ч. А. Коффин использовал для крепления двухугольных электродов, размещаемых по обе стороны от оси шва.



17 апреля 1939



Родился Александр Айзикович Загребельный (1939–2012) — представитель Патоновской школы, специалист в области космических технологий и конструкций. Принимал активное участие в разработке установок «Испаритель», «Испаритель-М», «Янтарь», которые в 1979–1989 г. работали на борту космических станций «Салют» и «Мир». Один из создателей универсального ручного электронно-лучевого инструмента, с помощью которого в 1984 г. на станции «Салют-7» впервые в мире в открытом космосе выполнены эксперименты по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий.

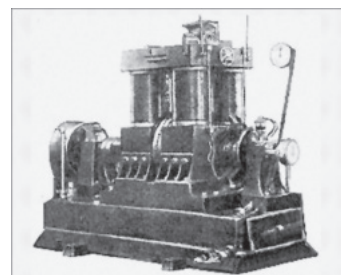
18 апреля 1932



Родился Всеволод Федорович Лапчинский (1932–1997) — представитель Патоновской школы, организатор и участник работ в области сварки и родственных технологий для условий космоса. Участвовал в подготовке важных экспериментальных исследований в космосе и разработке уникальной аппаратуры, в том числе аппаратов «УРИ», «Универсал», «Испаритель», «Янтарь», на которых были проведены эксперименты по сварке и родственным технологиям в открытом космосе.

19 апреля 1892

Зарегистрирован один из патентов Генри Говарда. На основе ряда патентов конструктор создал первую стационарную сварочную установку и внедрил ее на заводах фирмы «Lloid & Lloid» в Бирмингеме в 1887 г. Она состояла из четырех динамо-машин (500 A, 150 B), приводившихся в действие паровой машиной, 1800 «аккумуляторами Бенардоса» и балластными реостатами. Несколько позже новаторскую, по тем временам, идею — исключить из сварочной цепи аккумуляторную батарею предложил Н. Г. Славянов. На Пермских пушечных заводах она была реализована при изготовлении двух мощных динамо-машин постоянного тока (300 и 1000 A).



20 апреля 1938



Родился Владимир Яковлевич Саенко (1938–2015) — представитель Патоновской школы, известный специалист в области электрометаллургии, в частности, электрошлаковых технологий при переплаве, литье, сварке сталей и сплавов, изготовлении уникальных изделий для многих отраслей промышленности. В. Я. Саенко автор и соавтор около 320 научных трудов и около 300 авторских свидетельств и патентов.

21 апреля 1958

Во время проведения Брюссельской всемирной выставки 1958 г. Советский Союз объявил о создании электрошлаковой сварки. Метод электрошлаковой сварки (ЭШС) был разработан сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона в начале 1950-х гг. ЭШС является одной из разновидностей сварки плавлением. Она основана на выделении тепла при прохождении электрического тока через жидкий шлак, за счет чего расплавляются кромки свариваемых деталей и присадочный металл, а также поддерживается высокая температура расплава. Этот вид сварки открывал большие возможности в производстве тяжелого металлургического, кузнечнопрессового и другого оборудования.

**22 апреля 1886**

Завершилось строительство Статуи Свободы — одной из самых знаменитых скульптур в мире. Это подарок французских граждан к столетию американской революции. Металлический каркас статуи крепился к центральному стержню, сваренному из четырех металлических колонн при помощи автогенной сварки. Вокруг этих колонн были установлены винтовые металлические лестницы, состоящие из 168 ступеней каждая. Металлический каркас статуи покрыт тремястами медными листами, на закрепление которых пошло около 300 тысяч медных заклепок. Общий вес меди, использованной для облицовки статуи — 31 т, а общий вес ее стальной конструкции — 125 т. Установкой сооружения занималась фирма «Gaget & Gauthier».

**23 апреля 1854**

Родился Николай Гаврилович Славянов (1854–1897) — русский инженер, изобретатель электрической дуговой сварки металлическим электродом. Серьезное внимание изобретатель уделял механизации и автоматизации дуговой электросварки. Он изготовил и опробовал первый в мире сварочный полуавтомат — «электроплавильник». Обязательное автоматическое регулирование длины электрической дуги при использовании металлического электрода являлось важной технологической особенностью его способа сварки. Его мнение о невозможности процесса электросварки металлическим электродом без автоматического регулирования длины дуги впоследствии не подтвердилось: ручная сварка плавящимся электродом получила весьма широкое применение.

24 апреля 2014

Скульптор под псевдонимом TEJN установил одну из последних своих скульптур «Добиться свободы». TEJN — это псевдоним современного датского художника, который начал свою творческую работу в качестве уличного художника в 2007 г. Выполняя свои работы из металла и используя сварку, он получил известность благодаря несанкционированному созданию скульптур. Художник без разрешения властей приваривает или закрепляет памятник цепями там, где ему заблагорассудится. Позже скульптуры начали возвращать на свои места как памятники архитектуры. В своих работах скульптор пользуется сваркой, резкой, наплавкой и другими методами обработки металла. Сегодня его работы часто выставляются на престижных выставках.

**25 апреля 1990**

Выведен на орбиту шаттлом «Дискавери» STS-31 орбитальный телескоп «Хаббл». На сегодня это одно из самых современных оборудований для исследований в космосе. Для создания этого сложного аппарата использовали ряд сварочных технологий. При изготовлении специальных легких ячеистых зеркал использовалась лазерная сварка. В этой связи следует отметить компанию «Welded Sheet Metal Specialty Co.», которая постоянно принимала участие в сварочных работах при выполнении крупных проектов, таких как создание телескопа «Хаббл», изготовление космического корабля «Аполлон», строительство подводной лодки «Наутилус» и множестве других.



26 апреля 2012

Преодолев 540 миль с помощью буксиров, морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная» прибыла к месту базирования в Печорском море, где позже она монтировалась в общий блок на плаву с применением подводной сварки. Уже 20 декабря 2013 г. компания «Газпром нефть шельф» объявила о начале добычи нефти на МЛСП «Приразломная». В настоящий момент это — единственная платформа, ведущая добычу на российском арктическом шельфе. Строительство платформы потребовало широкого применения подводной сварки. Сварку выполняли порошковой проволокой ППС-ЭК1 (разработка ИЭС им. Е. О. Патона) диаметром 1,6 мм в вертикальном и потолочном положениях двумя полуавтоматами ПСП-3. Общая протяженность швов составила 1020 м.



27 апреля 1967

Открылась Всемирная выставка 1967 г., символом которой стала Монреальская биосфера. Построенная как павильон американской экспозиции международной выставки Экспо-67, биосфера стала одним из символов города Монреаль. Конструкция имеет вид большого шара, который состоит из множества соединенных сваркой между собой частей. Каждая из них выглядит как специальное молекулярное соединение, принадлежащее к особому классу так называемых аллотропных форм всем известного углерода. В мае 1976 г. в ходе ремонтных сварочных работ купол биосферы загорелся, но, к счастью, обошлось без жертв.



28 апреля 1972

К концу апреля 1972 г. сварщик Григорий Григорьевич Дочкин (1942–2013) освоил технику получения цветовой гаммы оттенков на титановых сплавах при сварке методом ТИГ. Используя этот эффект, Г. Г. Дочкин создал ряд уникальных художественных изделий, не имеющих аналогов. Сегодня многие из них находятся в частных коллекциях по всему миру.



29 апреля 1897



Родился Георгий Семенович Шагин (1897–1952) — советский конструктор стрелкового оружия. Наибольшую славу конструктору принесло создание пистолета-пулемета образца 1941 г. (ППШ), самого массового автоматического оружия Красной Армии во время Второй мировой войны. В нем широко применялись штампосварные конструкции, что значительно упростило его производство.

30 апреля 1941

Для постройки транспортного флота США в конце апреля были выбраны три типа судов, в том числе сухогруз «Либерти». 27 сентября 1941 г. на верфи «Бетлехемфза-филд» (округ Балтимор) был спущен на воду первый корабль этой серии — «Патрик Генри». В январе 1943 г. их было уже около 500. Только за 1942 г. благодаря замене клепаной конструкции и технологии клепки на сварную конструкцию и сварку судов было сэкономлено 500 тыс. т стали. Цикл постройки сократился до 50 дней.

