

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 11 С В А Р Ю В А Н Н Я 2019

Автоматическая сварка

Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Лашченко Г.І. Зварювальне виробництво в економіці України	3
Лобанов Л.М., Аснис Ю.А., Пискун Н.В., Вржижевський Е.Л., Міленін О.С., Великоіваненко О.А. Дослідження напружено-деформованого стану зварних з'єднань інтерметалідів системи TiAl	11
Крекутьова Р.О., Сараєв Ю.М., Семенчук В.М., Черепанов Р.О. Динаміка теплових процесів при зварюванні тонколистової низьколегованої сталі	16
Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислиця А.Н., Кузьмич-Янчук Є.К., Калюжний С.Н. Дослідження електричних і теплових характеристик плазмотрона для мікроплазмового напылення покриттів із порошкових матеріалів	24
Бой У., Кривцун І.В. Процеси зварювання неплавким електродом з модуляцією зварювального струму (Огляд). Частина I. Особливості горіння нестационарних дуг з тугоплавким катодом	29
Іванов В.П., Лещинський Л.К., Щербakov С.В. Моделювання технології напылення зносостійкого шару змінного хімічного складу	40

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Drimal D., Kasencak M., Kolenic F., Kramarcik A., Kovac L. Особливості електронно-променевого зварювання гарячекатаних алюмінієво-літійових сплавів	46
Книш В.В., Осадчук С.О., Соловей С.О., Ниркова Л.І., Рыбаков А.О. Методика прискорених корозійних випробувань для моделювання тривалого впливу атмосфери помірного клімату на зварні з'єднання	52

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

Нестеренков В., Хрипко К., Лук'янов В. Універсальна електронно-променева зварювальна установка	59
Дисертації на здобуття наукового ступеня	62

ХРОНІКА

Міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів»	63
Всеукраїнська конференція «Проблеми зварювання та споріднених технологій»	65
Збори асоціації «Електрод»	66
До 100-річчя від дня народження Б.С. Касаткіна	68
Пам'яті Б.О. Мовчана	69

ІНФОРМАЦІЯ

Пошаровий синтез за допомогою зварювальної дуги: економічний 3D-друк металевих виробів	71
--	----

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Lashchenko G.I. Welding production in the economy of Ukraine	3
Lobanov L.M., Asnis Yu.A., Piskun N.V., Vrzhezhevsky E.L., Milenin O.S., Velikoivanenko O.A. Investigation of stress-strain state of welded joints of intermetallics of the system TiAl	11
Krektuleva R.A., Saraev Yu.N., Semenchuk V.M., Cherepanov R.O. Dynamics of thermal processes in welding sheet low-alloyed steel	16
Borisov Yu.S., Voinarovych S.G., Kyslytsa A.N., Kuzmich-Yanchuk E.K., Kalyuzhny S.N. Investigation of electrical and thermal characteristics of plasmotron for microplasma spraying of coatings from powder materials	24
Boi U., Krivtsun I.V. Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review) Part 1. Peculiarities of burning of non-stationary arcs with refractory cathode	29
Ivanov V.P., Leshchinskiy L.K., Shcherbakov S.V. Modeling the technology of deposition of a layer of variable chemical composition	40

INDUSTRIAL

Drimal D., Kasencak M., Kolenic F., Kramarcik A., Kovac L. Peculiarities of electron beam welding of hot-rolled aluminum-lithium alloys	46
Knysh V.V., Osadchuk S.O., Solovej S.O., Nyrkova L.I., Rybakov A.O. Procedure of accelerated corrosion testing for modelling the long-term effect of moderate climate atmosphere on welded joints	52

BRIEF INFORMATION

Nesterenlov V., Khrypko K., Lukyanov V. Multipurpose electron beam welding machine	59
Theses for a scientific degree	62

NEWS

International Conference «Beam Technologies in Welding and Materials Processing»	63
All-Ukrainian Conference «Problems of Welding and Related Technologies»	65
In «Electrode» International Association	66
To 100th birth anniversary of B.S. Kasatkin	68
In memory of B.O. Movchan	69

INFORMATION

Layer-by-layer synthesis using welding arc: economical 3D printing of metal products	71
--	----



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну
в Міжнародному інституті зварювання
та в Європейській зварювальній федерації
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine
in International Institute of Welding
and in European Federation for Welding



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
Б.Є. Патон (головний редактор),
С.І. Кучук-Яценко (заст. гол. ред.),
О.М. Бердникова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, І.В. Кривцун,
Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,
С.Ю. Максимов, М.О. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
К.А. Ющенко;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
М.М. Студент, Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;
М. Зініград, університет Арієля, Ізраїль;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина;
Я. Пілярчик, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

Засновники

Національна академія наук України,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Редакція

В.М. Ліподаєв, Т.В. Юштіна, А.І. Суліма

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу.

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001
ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Передплата

Передплатний індекс 70031
12 випусків на рік (видається щомісячно)
Друкована версія: 2400 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
Електронна версія: 2400 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается
англійською мовою під назвою
«The Paton Welding Journal».
За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:

B.E. Paton (Editor-in-Chief),
S.I. Kuchuk-Yatsenko (Deputy Editor-in-Chief),
O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,
V.V. Knysh, I.V. Krivtsun,
Yu.M. Lankin, L.M. Lobanov,
S.Yu. Maksimov, N.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,
K.A. Yushchenko;
V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv;
V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;
M.M. Student, Karpenko Physico-Mechanical Institute
of NASU, Lviv;
M. Zinigrad, Ariel University, Israel;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany;
Ja. Pilarczyk, Welding Institute, Gliwice, Poland

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
International Association «Welding» (Publisher)

Editors

V.M. Lipodaev, T.V. Yushchina, A.I. Sulima

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kasimira Malevicha Str.
Tel.: (38044) 200 6302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
Email: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees.

Recommended for printing editorial board of the Journal.

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001
ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Subscription

Subscription index 70031
12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$180, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$150, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Institutions with current subscriptions on printed version
can purchase online access to the electronic versions
of any back issues that they have not subscribed to.
Issues of the Journal (more than two years old)
are available at a substantially reduced price.
«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished in English under
the title «The Paton Welding Journal».
The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ЭКОНОМИКЕ УКРАИНЫ

Г.И. Лащенко

НТК «ИЭС им. Е.О. Патона» НАН Украины, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@stc-paton.com

Рост объемов производства и потребления конструкционных материалов продолжает оставаться важной составляющей развития современной экономики. Для стабилизации и роста украинской экономики необходимо радикально увеличить потребление металлопроката с акцентом на промышленное строительство, реализацию масштабных инфраструктурных проектов, тяжелое, энергетическое и транспортное машиностроение. При этом процессы сварки, резки, наплавки и нанесения покрытий являются наиболее предпочтительными и распространенными инструментами создания широкого ассортимента конкурентоспособных изделий. В ближайшей перспективе для Украины жизненно важным вопросом остается поддержание в рабочем состоянии различного энергетического, перерабатывающего, добывающего, сельскохозяйственного оборудования, оборудования оборонного характера и объектов инфраструктуры с целью продления сроков их эксплуатации на основе использования инновационных технологий сварки и металлообработки. Библиогр. 9, рис. 2.

Ключевые слова: сварочное производство, национальная экономика, металлопотребление, промышленность Украины, машиностроение и инновационные технологии, малый бизнес

Роль сварочного производства в развитии национальной экономики. Развитое материальное производство составляет основу современной цивилизации. Большую роль в этом играют конструкционные материалы. Сначала XX век называли «чугунным», поскольку выплавка чугуна в мире превосходила производство стали, и в 1913 г. составляла 78,5 млн т (стали — 72,4 млн т). К концу XX века производство стали достигло 800 млн т, а чугуна — около 500 млн т (примерно 63 %), что позволило называть его «стальным веком». Во второй половине XX века были разработаны и внедрены в промышленность наукоемкие технологии производства стали, такие как вакуумно-дуговой переплав, электронно-лучевая плавка, плазменный переплав, электрошлаковая и индукционная плавка. Развитие этих процессов стимулировалось не только необходимостью выпуска продукции гражданского назначения, но в еще большей степени требованиями военно-промышленного комплекса, для решения проблем которого был необходим металл высокого качества.

Аналитики Международного института чугуна и стали (IISI) пришли к однозначному выводу о существовании прямой зависимости между ростом потребления стали и общим экономическим уровнем стран с высокими темпами роста внутреннего валового продукта (ВВП). К концу XX века и в последующие годы в таких странах, как США, Германия, Япония годовое потребление стального проката удерживалось на уровне 420...590 кг/чел. В Украине собственное потребление стального проката в 2007 г. составило примерно 25 % от произведенного, т.е. 8,7 млн т, а удельное потребление проката достигло примерно 190 кг/чел. В России этот показатель находился на

уровне 250 кг/чел. Для многих стран увеличение внутреннего потребления стали является важнейшим условием построения высокоразвитой экономики (рис. 1) [1]. Поэтому динамичное развитие экономики Украины невозможно без существенного увеличения металлопотребления. В то же время в связи с интенсификацией процесса деиндустриализации украинской экономики удельное потребление стального проката в 2013 г. снизилось примерно до 140 кг/чел.

Хотя сталь и удерживает ведущее положение на мировом рынке (93 % по массе от всего производства конструкционных материалов), ее позиции теснят алюминий, пластмассы и полимеры, идет внедрение в производство композитов и керамики. Сплавы на основе цветных металлов (Al, Cu, Ni, Mg, Ti) и пластмассы составляют примерно 7 % от группы конструкционных материалов. В группе цветных металлов и пластмасс доминирующие позиции занимают алюминий (38 %) и пластмассы (23 %) [2].

Начиная со второй половины XX века потребность в стали удовлетворялась не только за счет роста физического объема, но в значительной мере и за счет ее качества. Повышение прочностных и других служебных характеристик стали способствовало стабилизации ее потребления (по массе). Определенное влияние на потребление стали оказало и расширение применения алюминия и пластмасс.

За последние 20 лет на мировом рынке появилось более 1000 новых марок сталей различного назначения, существенно расширилась номенклатура стального проката, в том числе с различными покрытиями. К сожалению, на этом фоне достижения украинских металлургов выглядят весьма скромными.

В передовых странах с развитой экономикой основными потребителями стали являются промышленное и гражданское строительство, судостроение, тяжелое и энергетическое машиностроение, автомобилестроение, транспортное машиностроение, трубопроводный транспорт. Для большинства этих стран автомобилестроение и судостроение являются локомотивами современной экономики.

Промышленное применение алюминия обусловлено его малой плотностью ($2,7 \text{ г/см}^3$), примерно в три раза меньшей, чем у стали, повышенной хладостокостью, коррозионной стойкостью в окислительных средах и на воздухе.

Алюминий и его сплавы отличаются низкой температурой плавления (температура плавления чистого алюминия 660°C), высокой тепло- и электропроводностью, повышенным по сравнению со сталью коэффициентом линейного расширения и более низким значением модуля упругости.

Алюминиевые сплавы широко используют во многих отраслях машиностроения, а также гражданского и промышленного строительства [3]. При этом в летательных аппаратах доля конструкционных материалов из алюминиевых сплавов занимает до 80 % по массе. В последнее десятилетие особое внимание уделяют использованию алюминиевых сплавов в автомобиле-, вагоно-, судостроении. Значительная часть алюминиевой продукции в виде особо тонкого проката и фольги идет на производство тары и упаковки.

Среднее потребление в 2003 г. алюминия и его сплавов на душу населения в Украине составило 2,0 кг, в России — 2,5 кг, в Западной Европе — 19,8 кг, Германии — 27,1 кг, Японии — 27,9 кг, США — 29,2 кг [3]. Рост потребления алюминиевых сплавов в различных странах, как правило, связан с выпуском новой продукции. При этом следует отметить, что по показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят чугун, низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и титановым сплавам.

Фактором, сдерживающим объемы производства алюминия, считают его стоимость, определяемую высоким энергопотреблением металлургического производства алюминия.

Согласно [3] в 2003 г. внутренний спрос на алюминиевую продукцию в Украине составлял около 360 тыс. т в год. Основные потребители: стройиндустрия (275...280 тыс. т) и авиакосмическая промышленность (52 тыс. т). Остальное — изготовление кабельной продукции и упаковочной фольги.

В мировой практике получили промышленное применение и титановые сплавы различных групп прочности [2]. К группе малопрочных сплавов относят сплавы с пределом прочности до 750...800 МПа; среднепрочные сплавы имеют прочность без термообработки 1100...1200 МПа; высокопрочные титановые сплавы после упрочняющей термической обработки (закалки и последующего старения) могут иметь прочность более 1400 МПа.

К основным достоинствам титана и его сплавов относят:

- высокую коррозионную стойкость во многих природных, биологических и технологических средах, в которых использование традиционных сталей и сплавов невозможно либо требует дополнительных способов защиты;
- более высокую или равноценную удельную прочность и усталостную долговечность по сравнению с коррозионностойкими сталями и сплавами;
- экологическую чистоту и хорошую биологическую совместимость с живыми тканями, что позволяет успешно использовать титан и его сплавы для изготовления эндопротезов.

Благодаря своим уникальным свойствам титан находит применение как конструкционный материал для строительства подводных лодок, самолетов, ракет и космических летательных аппаратов, автомобилей, судов малого каботажного, а также при производстве товаров народного потребления. Используют титановые сплавы для изготовления теплообменной аппаратуры АЭС, подводных крыльев, гребных винтов, напряженных элементов донной части морских платформ, буровых труб и др.

Среди новых быстрорастущих областей применения титана следует отметить строительство заводов по производству сжиженного газа и регазификационных терминалов (до 250 т титанового проката на одну установку). В целом изготовление титановой продукции в виде проката слитков, слабов, поковок считается весьма перспективным направлением производства с учетом мирового увеличения спроса на эту продукцию [4].

Следует отметить, что в Украине разведано до разной степени достоверности 16 месторождений титановых руд, а в эксплуатации находятся 14 (см. Б. Соболев. Стокгольмский синдром Украинского титана. ZN.UA — 2018. — № 17). Согласно данным Геологической службы США, в Украине сосредоточен 1 % мировых запасов ильменитов и 5 % запасов рутила, а это основное сырье для производства титана. Согласно различным источникам, показатель доли Украины в разведанных запасах титановых руд — 20 %.

Украина имеет все элементы цепочки производства титана методом Кролла от добычи руд (ильменита, рутила) до проката готового металла и получения прочных, немагнитных труб и других изделий. Кроме того, функционирует специализированный Институт титана в г. Запорожье. Есть Запорожский титано-магний комбинат (ЗТМК), производство пигментов на «Сумыхимпроме» и «Крымском титане», плавка электронно-лучевым способом готовых титановых слэбов и заготовок на трех киевских предприятиях. Среди последних следует выделить завод «Антарес» мощностью 5 тыс. т титановых слэбов в год, что составляет около 7 % мирового производства этой продукции. Достроенные в 2000–2016 гг. четыре электронно-лучевые печи способны переплавить свыше половины титановой губки с ЗТМК в высококачественный металл высокой чистоты. Научно-производственный центр «Титан» при ИЭС им. Е.О. Патона может выплавлять 3 тыс. т титановых заготовок в год и прокатывать их в трубы для укрепления нефтяных скважин. Закарпатский металлургический завод (п.г.т. Вышково Закарпатской области) производит до 3600 т в год титановых порошков. В последнее время все три предприятия являются заложниками одного монополиста — ЗТМК и в основном простаивают.

Мировое потребление титанового проката составляет примерно 135 тыс. т. в год.

Российская корпорация «ВСМПО — Ависма» производит ежегодно около 30 тыс. т готового проката титана и его сплавов, в том числе для собственного потребления около 10–12 тыс. т (основные потребители ВПК и аэрокосмическая отрасль). Зависимость от российских поставок титанового проката у компании Boeing составляет 45 %, у ЕАДС — около 60 %, у Bombardier, Embraer, Pratt & Whitney, Rolls-Royce — почти 100 %.

Украина пока поставляет на мировые рынки преимущественно концентрат титановых руд. Так, по данным Госстаткомитета и Госстата, в 2015 г. отправлено 295 тыс. т, в 2016 г. — 463 тыс. т, а в 2017 г. — 583 тыс. т, из них непосредственно РФ около 35 % упомянутого концентрата. В то же время средняя цена реализации ильменитового концентрата составляла на протяжении 2003–2017 гг. не более 20 дол. США за тонну. При этом из одной тонны концентрата можно получить около 200 кг металлического титана, цена которого в упомянутый период колебалась от 5 до 40 дол. США за килограмм. Если бы в Украине были соответствующие производственные мощности титанового проката, то она бы не теряла от 625 до 5000 % рентабельности. Переработка проката в такие конечные изделия, как

медицинские протезы, спортивный инвентарь или оправы для очков, давала бы добавленной стоимости от 600 до 1200 %.

Для создания в Украине собственного производства титанового проката мощностью равной российской, требуется, по оценкам специалистов, около 2,5 млрд дол. США. Заинтересованные в этом компании и люди в мире есть. Нужна целенаправленная работа правительства и других государственных структур.

В материальном производстве для формообразования металлической продукции применяют различные технологии (штамповку, гибку, литье, ковку, сварку и др.). В то же время многолетний мировой опыт свидетельствует о многих преимуществах использования именно сварочных технологий [5].

Однако необходимо отметить, что сварка является лишь определенным технологическим способом получения неразъемных соединений, а поэтому сама по себе не может являться самостоятельным производством, или служить самоцелью какого-либо производственного процесса. Она должна рассматриваться как средство для достижения иной цели — получения сварных конструкций или непосредственно изделий. Изготовление же сварных конструкций представляет собой сложный производственный процесс, состоящий из целого комплекса взаимосвязанных операций, отличающихся по своему характеру, продолжительности и назначению. При этом используют различные технологии. На стадии подготовки проката доминирует правка и очистка. В процессе изготовления деталей для сварных конструкций используют различные технологии резки, гибки, штамповки. Сборочно-сварочные операции выполняют на основе применения различных способов и методов сварки, а послесварочную обработку реализуют с использованием технологических процессов, снижающих напряженно-деформированное состояние и улучшающих структурные и физико-механические характеристики сварных соединений.

Отмеченный выше комплекс работ в целом рассматривают как сварочное производство, организуемое обязательно с учетом особенностей и характера той или иной продукции, выпускаемой соответствующей отраслью (машиностроением, автомобилестроением, судостроением, аэрокосмической и др.).

В последнее время термин «сварочное производство» трактуют более широко [6]. В состав сварочного производства включают научно-исследовательские центры, ведущие исследования и разработки новых сварочных технологий, оборудования и материалов; промышленные предприятия

тия, осуществляющие выпуск сварных конструкций, основного и вспомогательного сварочного оборудования, сварочных материалов, средств защиты производственной и окружающей среды; сеть организаций, обеспечивающих связь разработчиков и потребителей сварочной техники; систему подготовки инженерных и рабочих кадров, состоящую из вузов I–IV уровня аккредитации и ПТУ.

Сварочное производство в своем развитии прошло путь от выполнения отдельной сварочной операции, имеющей вспомогательный характер (заварка дефектов отливок и поковок, ремонт изношенных деталей и т. п.), до выполнения комплекса операций на современных рабочих местах, участках, цехах, заводах-центросварях, формируемым по технологическому, предметному или смешанному принципам.

Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий. При этом до 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений, а толщина свариваемых деталей колеблется от микрометров до метров, масса сварных конструкций — от долей грамма до сотен и тысяч тонн [1].

Сварка и родственные технологии позволяют создавать оригинальные конструкции современных автомобилей, самолетов, судов, локомотивов и вагонов, аппаратов и установок для химической промышленности и энергетики, обеспечивают высокую надежность трубопроводного транспорта, многих типов строительных конструкций, средств электроники и приборов, в том числе работающих в экстремальных условиях, ракетно-космической техники и др.

Широкое применение сварных конструкций (СК) обусловлено возможностью:

- совмещать преимущества составной конструкции в производстве с достоинствами монолитных в эксплуатации;
- расширять выбор более рациональных конструктивных решений при создании высококачественных и надежных конструкций;
- применять в конструкциях разнородные материалы, наиболее соответствующие условиям работы различных элементов, что позволяет полноценно использовать свойства материалов, уменьшать массу и металлоемкость конструкций;
- снижать производственные затраты за счет улучшения технологии изготовления деталей.

В зависимости от назначения сварных конструкций и предъявляемых к ним требований используют те или иные конструкционные материалы.

Сварочное производство играло ключевую роль в становлении индустриального общества, что особенно рельефно видно на примере СССР [7].

На этом этапе основным движущим фактором развития являлись возможности, которые представляли технологии сварки в создании новых видов продукции и увеличении масштабов их производства.

Постиндустриальное общество зарождалось в недрах индустриального и на его базе. Поэтому задачи, решаемые сварочным производством в постиндустриальный период, частично сохраняются. Имеется в виду создание новых типов продукции и наращивание объемов их выпуска. Однако на первый план выходит задача обеспечения высокого качества изделий с новыми потребительскими характеристиками, и в том числе качества самой сварочной продукции, т. е. сварных конструкций.

С одной стороны, сварочное производство, являясь одним из элементов постиндустриального общества, участвует через создаваемую продукцию в его формировании, а с другой использует достижения постиндустриального общества для своего развития. При этом рост наукоемкости сварочного производства способствует повышению качества продукции, ее эффективности и конкурентоспособности. По мнению Американского и Немецкого сварочных обществ, процессы сварки, резки и нанесения покрытий и в перспективе будут наиболее предпочтительными и распространенными способами создания широкого ассортимента конкурентоспособных материалов и изделий.

Сварочное производство, в большинстве своем сосредоточенное в составе предприятий машиностроения, в полной мере ощутило на себе негативные процессы в экономике страны, происходящие в последние годы. В то же время в Украине существует несколько потенциальных направлений увеличения металлопотребления.

На объектах базовых отраслей промышленности Украины (черной и цветной металлургии, машиностроения, энергетической, угледобывающей, нефтегазовой и др.) эксплуатируют 36 млн т несущих металлических конструкций [8]. Структура фонда эксплуатируемых металлических конструкций приведена на рис. 2. Большая часть металлических конструкций — это конструкции зданий и сооружений (около 60 %), металлические листовые конструкции (преимущественно стальные резервуары), электросетевые конструкции (мачты, опоры ЛЭП), а также мосты. Основу эксплуатируемого металлофонда составляют металлические

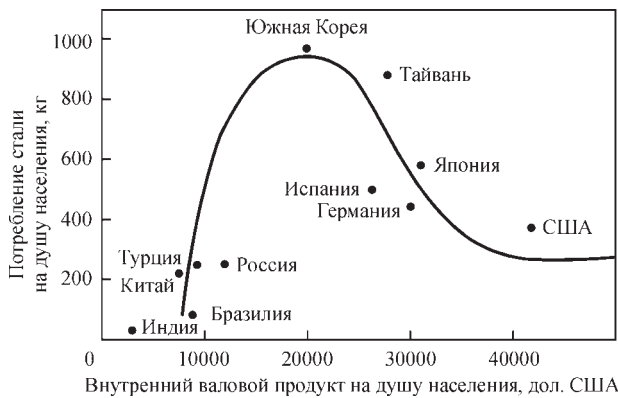


Рис. 1. Кривая интенсивности использования стали

конструкції, введенні в експлуатацію в 1950–1983 гг., т.е. прослужившие 33–66 лет.

Согласно проведенным исследованиям [8], физический износ металлических конструкций на момент выхода их из строя составляет 35–40 %. Относительно промышленных зданий это означает, что средний срок их службы составляет 40...50 лет. По оценкам экспертов, к 2001 г. 7...8 % существующего металлофонда уже находилось в фазе завершения срока эксплуатации. За последние годы ситуация еще больше усугубилась. Отсутствие средств для замены конструкций заставляет владельцев продлевать срок эксплуатации конструкций, физический износ которых достигает 35...40 %, что нередко приводит к авариям, а материальный ущерб в десятки раз превышает стоимость их восстановления и замены.

Сегодня можно констатировать, что более 25 % (3 млн т) имеющегося металлофонда строительных конструкций нуждается в срочной замене [9]. Технически эта задача не вызывает больших сложностей, так как в Украине имеются производственные мощности, способные выпускать ежегодно до 450 тыс. т металлоконструкций различного назначения. Нужна Государственная программа работ и соответствующие финансовые ресурсы.

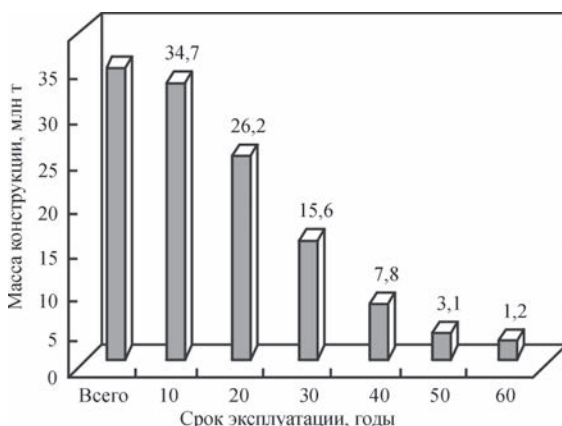


Рис. 2. Диаграмма структуры фонда металлических конструкций, эксплуатируемых в Украине

По данным «Укравтодора» только на реконструкцию дорог государственного значения понадобится около 10 млн т металлопроката, выпускаемого отечественными металлургическими заводами.

Значительные объемы стального проката (не менее 2 млн т в течение 5 лет) необходимы для восстановления подвижного состава железных дорог. Вагоностроительные заводы Украины — ОАО «Крюковский вагонзавод», ОАО «Азоввагонмаш», ОАО «Днепровагонмаш» пока еще располагают некоторыми возможностями для ежегодного выпуска 15...20 тыс. новых вагонов.

Огромный металлофонд накоплен в газотранспортной системе (ГТС) Украины, общая протяженность которой составляет 37,6 тыс. км, в том числе длина магистральных газопроводов — 22,2 тыс. км. В составе ГТС эксплуатируют 81 компрессорную станцию с 765 газоперекачивающими агрегатами общей мощностью 5,6 млн кВт.

Старение основных фондов ГТС не только снижает надежность ее работы, но и чревато внезапными разрушениями, авариями, это ставит под угрозу жизнь и здоровье работающего персонала и людей, проживающих в районах прокладки газопроводов. Вместе с тем газоперекачивающие агрегаты ГТС являются морально устаревшими, энергозатратными, что приводит к чрезмерным расходам газа на собственные нужды, которые в 2006 г. составили 4,6 млрд м³.

За годы независимости Украины, благодаря усилиям ученых и специалистов ИЭС им. Е.О. Патона и других организаций, разработаны методы диагностики и технологии ремонта, способствующие продлению сроков эксплуатации трубопроводов и других ответственных технических систем и конструкций. Однако проблему деградации линейной части трубопроводов нельзя решить только за счет использования ремонтных технологий. Неизбежна замена труб на протяженных участках ГТС новыми трубами, изготовленными из современных сталей. Подготовлены также фундаментальные предложения по модернизации компрессорных станций ГТС с использованием научного и производственного потенциала отечественных предприятий «Зоря-Машпроект» (г. Николаев), ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе», АО «Мотор-Січ» (г. Запорожье), располагающих современными технологиями электронно-лучевой сварки, пайки, газотермического напыления и др.

Пока же судьба украинской ГТС находится в «подвешенном» состоянии. И хотя НАК не закупает российский газ для потребителей Украины с осени 2015-го, обязательства транспортировать «газпромовский» товар через наши ГТС выполня-

ются исправно. Так, в 2017-м «Укртрансгаз» поставил потребителям российского газа 93,5 млрд м³, в 2016-м — 82,2 млрд, в 2015-м — 67,1 млрд, в 2014-м — 62,2 млрд м³. В 2019 г. заканчивается действие контракта НАК «Нафтогаз Украины» с «Газпромом» о транзите природного газа в ЕС. Россия продолжает продавливать идею строительства альтернативного «Северного потока-2».

Для Украины важна даже не сумма прибыли от транзита (более 2 млрд дол./год), а гарантированные объемы газа, позволяющие загрузить трубопроводы и сохранить ГТС. Это возможно в случае наличия европейского оператора-партнера газотранспортной системы, который в будущем будет вести совместно с НАК «Нафтогаз Украины» переговоры с «Газпромом» по поставке газа ЕС.

В декабре 2017 г. Правительство Украины официально начало процедуру отбора международного партнера для совместного управления украинской ГТС. К осени 2018 г. Германия и другие европейские страны дали согласие на строительство газопровода «Северный поток-2». Скорее всего он будет в любом случае построен. Поэтому вопрос транспортировки газа в Европу по украинским трубопроводам еще больше обострился. Многие решения по этому вопросу зависят от позиций США, ЕС и России. И, хотя и в меньшей степени, но и нашего правительства. Определенные перспективы по увеличению металлопотребления в Украине связаны с расширением использования возобновляемой энергетики (ветровой, солнечной, биогаза и биотоплива), которая должна лечь в основу нашей энергетической стратегии. Речь идет, прежде всего, о создании ветросиловых установок и гидроаккумулирующих станций, а в перспективе — строительство панъевразийской энергетической системы.

Существуют и другие направления. Например, по версии американского предпринимателя Илона Маска по территории Украины могут пройти 5 из 11 веток сверхскоростного наземного транспорта Hyperloop, из которых три прочерчены через Киев: первая соединит Китай, Европу и Канаду, вторая — Азию, Ближний Восток, Европу и Северную Африку, а третья — Испанию и Китай. Из Днепра и Кривого Рога на таком транспортном средстве можно будет добраться до Индии, а из Харькова, Донецка или Одессы — в Америку. Это не фантастика, но и не завтрашний день.

На ближайшие 5–7 лет для Украины жизненно важным вопросом остается поддержание в рабочем состоянии различного энергетического перерабатывающего, добывающего, сельскохозяйственного оборудования, оборудования оборонного характера и объектов инфраструктуры с целью продления срока их эксплуатации. Эти работы мо-

гут быть выполнены только на основе применения сварки и родственных технологий.

Поэтому ремонтные технологии на основе сварки, наплавки, напыления и термической резки по-прежнему будут востребованы как в краткосрочной, так и в среднесрочной перспективе. Отечественное сварочное производство располагает соответствующим потенциалом для проведения ремонтных работ. Здесь же найдется место и для инициативы представителей малого бизнеса. В этом убеждают многочисленные примеры активного участия малого бизнеса в модернизации и ремонте военной техники. Но такая работа должна быть системной и соответствующим образом организована с привлечением специалистов «большого» бизнеса, имеющих достаточный уровень знаний и опыта. Особенно нужны инновационные технологии.

Если говорить о сварочном производстве в Украине в части выпуска оборудования и материалов, то имеющиеся производственные мощности украинских предприятий-изготовителей позволяют удовлетворить внутренние потребности по группе товаров электросварочного оборудования и сварочных материалов, а также осуществлять поставки продукции на внешние рынки [6].

Дальнейшее устойчивое развитие рынков сварочного оборудования и материалов возможно при активном трансфере высоких сварочных технологий и других инноваций. Сварочное производство страдает от свойственной всей украинской промышленности болезни: ликвидация отраслевой науки и большинства опытно-производственных подразделений — необходимых звеньев для реализации в промышленных объемах результатов научных разработок.

В былые времена потенциал отраслевой науки определялся не только наличием отраслевых институтов, но и функционированием ключевых и средних предприятий, имеющих свои КБ, хорошо оснащенные заводские лаборатории. К примеру, Каховский завод электросварочного оборудования много лет назад создал филиал опытно-конструкторского бюро, которое позволило существенно ускорить внедрение новой сварочной техники в производство и сегодня это предприятие является современным инжиниринговым центром. К сожалению, таких примеров в украинском машиностроении осталось немного.

Но по мнению автора настоящей статьи не все так безнадежно. Эти функции должен взять на себя малый бизнес. Такой процесс в Украине уже идет. Приведем несколько примеров.

Так, научно-производственная фирма «ВИСП» (г. Киев) на украинском рынке присутствует поч-

ти 15 лет и зарекомендовала себя как надежный разработчик и поставщик сварочного оборудования (установки, станки, вращатели, кантовали), оборудования для плазменного и дугового напыления, различных средств автоматизации и других изделий. НПФ «ВИСП» тесно сотрудничает с ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ в части технологии дуговой сварки неповоротных стыков труб, наплавки меди, в том числе трением с перемешиванием. Ведутся также совместные работы с Институтом металлофизики и другими институтами НАН Украины.

ООО «Навко-Тех» (г. Киев) выполняет технологические работы, проектирует и изготавливает специализированное оборудование для автоматической сварки прямолинейных и кольцевых швов, установки для наплавки цилиндрических, конических и плоских поверхностей, сварочные комплексы на базе промышленных роботов Fanuc.

ООО «Стил Ворк» (г. Кривой Рог) специализируется на защите промышленного оборудования от разрушающих факторов на предприятиях горно-металлургической, цементной, угольной и других отраслей промышленности, используя инновационные сварочные технологии.

Перечисленные выше и многие другие компании вносят ощутимый практический вклад в развитие отечественного сварочного производства. Дальнейшая судьба украинского сварочного производства во многом зависит от изменения структуры отечественной экономики, производственной стратегии страны, и некоторых других факторов.

Список литературы

1. Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. (2008) Состояние и перспектива современного рынка сварочной техники. *Обзорная информация ИЭС*, 2.

2. Лашенко Г.И. (2012) *Современные технологии сварочного производства*. Киев, Экотехнология.
3. Ищенко А.А., Лабура Т.М., Бернадский В.Н. и др. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных конструкциях*. Киев, Экотехнология.
4. Ахонин С.В. (2018) Тенденции развития специальной электрометаллургии титана в Украине. *Автоматическая сварка*, 11–12, 151–157.
5. Патон Б.Е. (1999) Проблемы сварки на рубеже веков. *Автоматическая сварка*, 1, 4–14.
6. Мазур А.А., Липодаев В.Н., Пустовойт С.В. и др. (2017) Современное состояние рынка сварочного оборудования и материалов в Украине. *Автоматическая сварка*, 11, 40–46.
7. (1981) *Сварка в СССР*. Том 1. Развитие сварочной техники и науки в сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. Москва, Наука.
8. Шимановский А.В., Гордеев В.Н., Оглобля А.Н. и др. (2001) Техническое состояние строительных металлических конструкций в Украине. *Автоматическая сварка*, 9, 33–38.
9. Лашенко Г.И. (2009) Сварочное производство и национальная экономика. *Сварщик*, 1, 34–39.

References

1. Bernadsky, V.N., Makovetskaya, O.K. (2008) State-of-the-art and perspective of modern market of welding engineering. *PWI survey information*, 2 [in Russian].
2. Lashchenko, G.I. (2012) *Modern technologies of welding production*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
3. Ishchenko, A.A., Labur, T.M., Bernadsky, V.N. et al. (2006) *Aluminium and its alloys in modern structures*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
4. Akhonin, S.V. (2018) Tendencies of development of special electrometallurgy of titanium in Ukraine. *The Paton Welding J.*, 11–12, 134–139.
5. Paton, B.E. (1999) Problems of welding at the turn of the century. *Avtomatic. Svarka*, 1, 4–14 [in Russian].
6. Mazur, A.A., Lipodaev, V.N., Pustovojt, S.V., Petruk, V.S. (2017) State-of-the-art of welding equipment and consumables market in Ukraine. *The Paton Welding J.*, 11, 31–37.
7. (1981) *Welding in USSR*. Vol. 1: Development of welding engineering and science. Technological processes, welding materials and equipment. Moscow, Nauka [in Russian].
8. Shimanovsky, A.V., Gordeev, V.N., Ogloblya, A.N. et al. (2001) Technological state of building structures in Ukraine. *The Paton Welding J.*, 9, 33–38.
9. Lashchenko, G.I. (2009) Welding production and national economy. *Svarshchik*, 1, 34–39 [in Russian].

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО В ЕКОНОМІЦІ УКРАЇНИ

Г.І. Лашенко

НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України, м Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@stc-paton.com

Зростання обсягів виробництва і споживання конструкційних матеріалів продовжує залишатися важливою складовою розвитку сучасної економіки. Для стабілізації та зростання української економіки необхідно радикально збільшити споживання металопрокату з акцентом на промислове будівництво, реалізацію масштабних інфраструктурних проєктів, важке, енергетичне і транспортне машинобудування. При цьому процеси зварювання, різання, наплавлення і нанесення покриттів є найбільш переважними і поширеними інструментами створення широкого асортименту конкурентоспроможних виробів. У найближчій перспективі для України життєво важливим питанням залишається підтримка в робочому стані різного енергетичного, переробного, видобувного, сільськогосподарського обладнання, обладнання оборонного характеру і об'єктів інфраструктури з метою продовження термінів їх експлуатації на основі використання інноваційних технологій зварювання та металообробки. Бібліогр. 9, рис. 2.

Ключові слова: зварювальне виробництво, національна економіка, металоспоживання, промисловість України, машинобудування та інноваційні технології, малий бізнес

WELDING PRODUCTION IN THE ECONOMY OF UKRAINE

G.I. Lashchenko

STC «E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@stc-paton.com

The growth in volumes of production and consumption of structural materials continues to be an important component in the development of modern economy. For stabilization and growth of the Ukrainian economy, it is necessary to dramatically increase the consumption of rolled metal products with an emphasis on industrial construction, implementation of large-scale infrastructure projects, heavy, power and transport engineering. Moreover, the processes of welding, cutting, surfacing and coating are the most preferred and widespread means for creating a wide range of competitive products. In the near-term prospect, the maintenance of different power, treating, mining, agricultural, defence equipment and infrastructure facilities in order to extend their service life through the use of innovative welding and metal treatment technologies is a vital point for Ukraine. 9 Ref., 2 Fig.

Keywords: welding production, national economy, metal consumption, industry of Ukraine, engineering and innovative technologies, small business

Поступила в редакцію 25.09.2019



ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ СИСТЕМЫ TiAl*

Л.М. Лобанов, Е.А. Аснис, Н.В. Пискун, Э.Л. Вржижевский, А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко**
 ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе было исследовано напряженное состояние сварных соединений интерметаллида системы TiAl. Определено влияние напряженного состояния сварного шва на образование холодных трещин. Была создана математическая модель и проведены вычислительные эксперименты по определению остаточных сварочных напряжений в сварном соединении. Методами оптической и электронной микроскопии была исследована структура сварных соединений интерметаллида системы титан–алюминий. При этом установлена взаимосвязь скорости охлаждения материала после окончания процесса сварки и структуры сварного соединения. По результатам проведенных численных экспериментов и металлографических исследований была разработана технология сварки интерметаллидного сплава с последующей локальной термообработкой, позволяющей получать бездефектные сварные соединения. Библиогр. 7, рис. 4.

Ключевые слова: интерметаллид, электронно-лучевая сварка, напряжения, холодные трещины, локальная термическая обработка

Интерметаллидные сплавы системы TiAl считаются перспективными материалами при производстве турбин авиационных двигателей и других изделий аэрокосмической техники, а также для автомобилестроения и для энергогенерирующих турбин в тепловых электростанциях. Они отличаются высокой прочностью, жаропрочностью, ползучестью, хорошей коррозионной стойкостью при высоких температурах. Однако при всех указанных достоинствах они характеризуются низкой пластичностью при комнатных температурах, что приводит к значительным трудностям при получении различных полуфабрикатов. Поэтому успешная реализация сплавов системы TiAl зависит от достижения подходящей комбинации пластичности при комнатной температуре, прочности, усталостной прочности, ползучести, трещиностойкости, а также стойкости к окислению и коррозии. Требуемые механические свойства тесно связаны с такими факторами как химический состав, микроструктура и технология обработки. Одним из вариантов повышения пластичности является легирование сплавов элементами, позволяющими оказывать влияние на формирование структуры в процессе остывания сплава [1]. Промышленная реализация этих сплавов также зависит от разработки технологий их соединения. Из интерметаллидов может быть изготовлен ши-

рокий ассортимент изделий, часть из которых являются сварными узлами, поэтому разработка технологии сварки интерметаллида системы TiAl является весьма актуальной [2].

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) — один из наиболее перспективных методов получения сварных соединений указанных материалов [3]. При получении сварных соединений интерметаллидов системы TiAl существенным их дефектом являются холодные трещины в швах, которые возникают при температурах ниже 700 °С, когда материал переходит из вязкого в хрупкое состояние. Хрупкость сварного шва в состоянии после сварки, в свою очередь, определяется его структурой и, при нарастании сварочных напряжений в процессе остывания приводит к появлению дефектов типа холодных трещин, источником которых являются микротрещины, дислокации и др.

Целью данной работы было исследование напряженно-деформированного состояния сварных соединений интерметаллидов системы TiAl и разработка технологии сварки, позволяющей получать бездефектные сварные соединения.

Для вычисления величины сварочных напряжений необходимо учесть тепловое воздействие на свариваемый металл, определяемое погонной энергией при сварке. Наиболее важной характеристикой погонной энергии является то, что она определяет скорость остывания металла и, следовательно, воздействует на микроструктуру свар-

Л.М.Добанов — <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>

*Публикуется по материалам доклада, представленного на международной конференции «Инновационные технологии и инжиниринг в сварке и родственных технологиях – POLYWELD 2019», 23-24 мая, 2019 г., НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».

**В работе принимали участие И.Л. Богайчук, Г.Ф. Розынка, И.И. Статкевич, Т.Г. Таранова.

© Л.М. Лобанов, Е.А. Аснис, Н.В. Пискун, Э.Л. Вржижевский, А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, 2019

ного шва и околошовной зоны. Поскольку ЭЛС проходит при высокой концентрации энергии, то в результате образовавшаяся ЗТВ имеет незначительные размеры 1 мм [4].

Сварку образцов интерметаллидного сплава системы TiAl (Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr) размером 30×100 мм толщиной 3 мм проводили при погонной энергии 2500 Дж/см.

Сварные швы интерметаллида системы TiAl, полученные ЭЛС при указанной погонной энергии сварки имели поперечные холодные сквозные трещины, проходящие через шов в околошовную зону и основной материал.

Зарождение холодных трещин при сварке происходит на стадии охлаждения в результате нарастания напряжений. Для расчетов напряженного состояния была создана математическая модель, на основании которой проведены вычислительные эксперименты.

Для свариваемых пластин толщиной 3 мм ЭЛС проходит в режиме кинжального проплавления, поэтому температурное поле можно рассматривать равномерным по толщине [5]. Кинетика температур может быть описана с помощью нестационарного уравнения теплопроводности:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] - \frac{\alpha_T(T - T_0) + \varepsilon_0\sigma_{SF}(T^4 - T_0^4)}{\delta} + q, \quad (1)$$

где $c\gamma$, λ — зависящие от температуры объемная теплоемкость и теплопроводность металла, соответственно; T — температура конструкции в момент времени t в точке с координатами (x, y) ; α_T — коэффициент поверхностной теплоотдачи в оснастку (опорный стол); ε_0 — степень черноты поверхности пластин; σ_{SF} — константа Стефана-Больцмана; T_0 — температура окружающей среды; q — поток тепла от источника сварочного нагрева в рассматриваемой области поверхности, который в случае кинжального проплавления при ЭЛС может быть описан, как

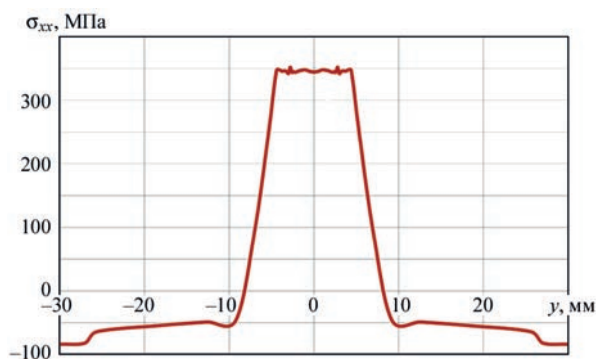


Рис. 1. Распределение продольных напряжений по длине шва

$$q = \frac{\eta UI}{\pi \delta K_s} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{K_s}\right), \quad (2)$$

где η — коэффициент полезного действия источника сварочного нагрева; U — ускоряющее напряжение на электронно-лучевой пушке; I — сварочный ток; K_s — коэффициент концентрации потока энергии в электронном пучке.

Граничные условия к уравнению теплопроводности (1) для рассматриваемого случая ЭЛС в вакууме имеют вид:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_T(T - T_C), & \text{в области контакта с оснасткой} \\ \varepsilon_0\sigma_{SF}(T^4 - T_C^4), & \text{на свободных поверхностях} \end{cases} \quad (3)$$

где n — нормаль к поверхности конструкции.

На рис. 1 показано распределение остаточных сварочных напряжений по длине шва, полученных с помощью вычислительного эксперимента.

Наибольший уровень остаточных напряжений — 330 МПа наблюдается в центре шва, что подтверждается также данными, полученными методом рентгеноструктурного анализа — 335 МПа. На основном материале напряжения из растягивающих переходят в сжимающие. Сварочные напряжения, возникающие в процессе остывания образца, в сочетании с хрупкой структурой металла шва, приводят, в свою очередь, к появлению дефектов типа холодных трещин.

Металлографические исследования структуры и поверхности излома сварного шва показаны на рис. 2. Микроструктура сварного шва рис. 2, а состоит из γ -TiAl- и α_2 -Ti₃Al-фаз. Сварной шов имеет твердость 5100...5300 МПа. По данным фактографических исследований (рис. 2, б) видно, что разрушение сварных образцов наблюдается в упругой области транскристаллитным изломом. На поверхности излома наблюдаются участки с различной структурой. В металле шва развитие магистральной трещины проходило ступенчато.

Указанная структура является малопластичной. При высокой скорости охлаждения металла шва — 500 °C/с, создаются условия для образования метастабильных фаз, увеличивающих склонность металла к холодному растрескиванию. Большую роль в образовании трещин играют остаточные сварочные напряжения и, особенно, нарастание их в процессе остывания в результате высокого температурного градиента. В целях борьбы с холодными трещинами необходимо обеспечить замедленную скорость охлаждения со снижением температурного градиента и, соответственно, уровень напряженного состояния [6]. Снижение на-

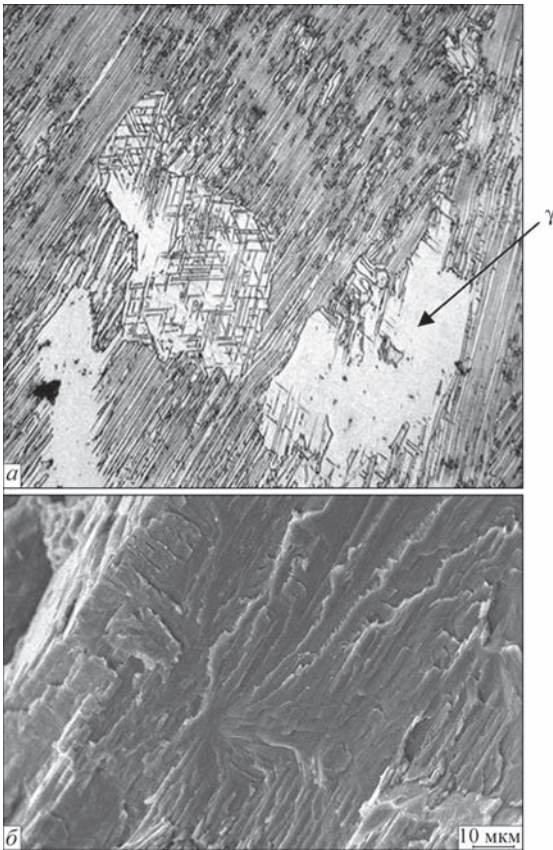


Рис. 2. Микроструктура металла шва (а) и поверхность излома сварного шва (б), полученного ЭЛС

пряженного состояния является важным фактором в борьбе с образованием холодных трещин. Для этого необходимо проводить термическую обработку сварных соединений.

В связи с тем, что трещины образуются непосредственно после сварки, отсутствует возможность проведения термообработки в стационарной печи. Наиболее рациональной является локальная термообработка (ЛТО) электронным лучом. Нами разработана ЛТО сварных соединений интерметаллида системы TiAl с регулируемой скоростью остывания. Этот процесс осуществляется следующим образом: непосредственно после сварки электронный луч выводится на середину сварного шва и с помощью специальной компьютерной программы разворачивается до требуемой конфигурации в одну и другую сторону от середины до конца шва. При этом луч остается неподвижным, а сварочный ток снижается на 1/3.

Благодаря снижению сварочного тока погонная энергия в процессе ЛТО уменьшается до 1700 Дж/см, что в 1,5 раза меньше по сравнению с этим же показателем при сварке.

Время указанной термообработки составляет 5 мин. При этом, как показали исследования, температура сварного соединения поддерживается до 950 °C. Скорость охлаждения в этом случае снижается до 30 °C/с. В связи с этим, уменьша-

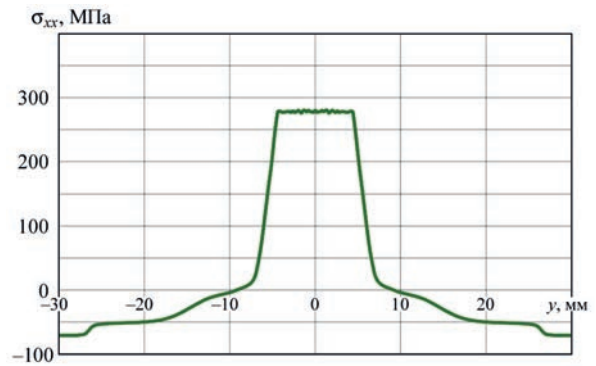


Рис. 3. Распределение продольных напряжений по длине шва после ЛТО

ется температурный градиент и, соответственно, сварочные остаточные напряжения снижаются до 260 МПа. В этом случае холодные трещины в сварных швах, практически, не образуются. На рис. 3 показано напряженное состояние сварного соединения после ЛТО.

Разработанная технологическая схема ЭЛС и термообработки позволяет снизить уровень остаточных сварочных напряжений более, чем на 25 %.

Металлографические исследования сварного соединения, полученного ЭЛС с последующей ЛТО (рис. 4, а) показали, что металл шва имеет трехкомпонентную структуру: матрицу γ -TiAl-фазы, колонии (γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al)-фаз и выделениями остаточной β_0 (B2)-фазы по границам колоний. Твердость металла шва составля-

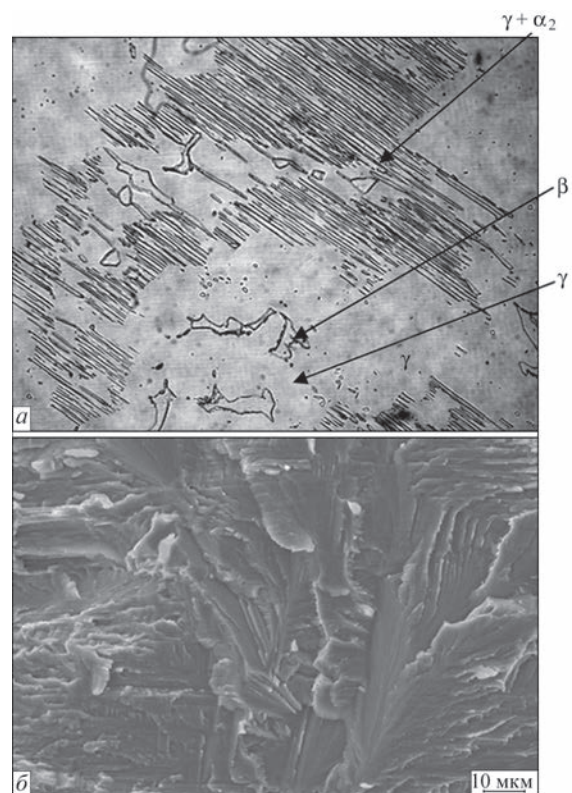


Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$) металла шва (а) и поверхность излома (б), полученного ЭЛС с последующей термообработкой

ет 4400...4500 МПа. Показано [7], что подобная структура несколько повышает пластичность и, в сочетании с более низкими напряжениями, чем в исходном состоянии, трещиностойкость сварного шва интерметаллида.

Исследования изломов образцов, полученных по предложенной схеме ЭЛС+ЛТО показали, что разрушение проходит по интеркристаллитному механизму. На рис. 4, б приведена фрактография сварного шва. Разрушение металла шва межзеренное. Наблюдается дробление γ -фазы за счет дисперсных выделений α_2 -фазы. На поверхности излома фасетки скола разделены участками отрыва, что обусловлено пластическим сдвигом и является признаком пластичности материала. Можно считать, что материал в какой-то степени сопротивляется разрушению и имеет некоторую пластичность.

Сравнивая рис. 2 и 4 можно также сказать, что высокая погонная энергия при сварке обеспечивает более крупнозернистую структуру металла шва по сравнению с термообработкой на более низкой погонной энергии.

Таким образом, разработанные режимы локальной термической обработки позволяют, в результате уменьшения погонной энергии, замедлить скорость охлаждения сварного шва и, тем самым, создать благоприятные структурные изменения, а также значительно снизить напряженное состояние сварных соединений и практически избежать образования холодных трещин.

Выводы

Разработана математическая модель и проведены вычислительные эксперименты, позволившие рассчитать напряженное состояние сварного шва интерметаллида в исходном состоянии после сварки и ЛТО.

Скорость охлаждения при применении термообработки составляет 30 °C/с по сравнению со скоростью охлаждения непосредственно после сварки — 500 °C/с.

Уменьшение погонной энергии в 1,5 раза замедляет скорость охлаждения сварного шва, что способствует образованию трехкомпонентной структуры: матрица γ -TiAl-фазы, колонии

(γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al)-фаз и выделения остаточной β_0 (B2)-фазы по границам колоний, что позволяет увеличить пластичность сварного шва.

При применении термообработки снижается температурный градиент и, соответственно, сварочные напряжения уменьшаются более, чем на 25 %.

Показано, что использование ЛТО позволяет значительно улучшить структуру металла шва, снизить величину остаточных сварочных напряжений и, тем самым, повысить трещиностойкость сварного шва.

Список литературы

1. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *Journal of Alloy and Compounds*, **643**, 182–166.
2. Ильин А.А., Калачов Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
3. Патон Б.Е. (ред.) (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
4. Рыкалин Н.Н. (2012) *Расчеты тепловых процессов при сварке*. Изд-е 1951, Москва, «Книга по Требованию».
5. Махненко В.И. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев, Наукова думка.
6. Chen Guoging, Zhang Binggang, Liu Wei, Feng Jicai (2011) Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *Journal of Intermetallics*, **19**, 1857–1863.
7. Поварова К.Б., Банных О.А. (1999) Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов. Ч. I. *Материаловедение*, **3**, 27–33.

References

1. Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl (Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *J. of Alloy and Compounds*, **643**, 182-186.
2. Iliin, A.A., Kalachov, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys, composition, structure, properties*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
3. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Rykalin, N.N. (2012) *Calculations of thermal processes in welding*. Moscow. Reedition of 1951 [in Russian].
5. Makhnenko, V.I. (1976) *Calculation methods of investigation of kinetics of welding stresses and strains*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Chen Guoging, Zhang Binggang, Liu Wei, Feng Jicai (2011) Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *J. of Intermetallics*, **19**, 1857-1863.
7. Povarova, K.B., Bannykh, O.A. (1999) Principles of creation of structural alloys based on intermetallics. Pt 1. *Materialovedenie*, **3**, 27-33 [in Russian].

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ СИСТЕМИ TiAl

Л.М. Лобанов, Ю.А. Асніс, Н.В. Піскун, Е.Л. Вржижевський, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко

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

В роботі було досліджено напружений стан зварних з'єднань інтерметаліда системи TiAl. Визначено вплив напруженого стану зварного шва на утворення холодних тріщин. Була створена математична модель і проведені обчислювальні експе-

рименти по визначенню залишкових зварювальних напружень у зварному з'єднанні. Методами оптичної та електронної мікроскопії була досліджена структура зварних з'єднань інтерметаліда системи титан-алюміній. При цьому встановлено взаємозв'язок швидкості охолодження матеріалу після закінчення процесу зварювання і структури зварного з'єднання. За результатами проведених численних експериментів та металографічних досліджень була розроблена технологія зварювання інтерметалідного сплаву з подальшою локальною термообробкою, що дозволяє отримувати бездефектні зварні з'єднання. Бібліогр. 7, рис. 4.

Ключові слова: інтерметаліди, електронно-променеве зварювання, напруги, холодні тріщини, локальна термічна обробка

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE OF WELDED JOINTS OF INTERMETALLICS OF THE SYSTEM TiAl

L.M. Lobanov, Yu.A. Asnis, N.V. Piskun, E.L. Vrzhezhevsky, O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kyiv.ua

In the work, stress state of welded joints of intermetallic of the TiAl system was investigated. The influence of stress state of the weld on cold cracks formation was determined. A mathematical model was created and computational experiments were carried out to determine residual welding stresses in welded joint. Using the methods of optical and electron microscopy, the structure of welded joints of intermetallic of titanium-aluminum system was studied. At the same time, the relationship between the cooling rate of the material after the end of welding process and the structure of welded joint was established. Based on the results of numerical experiments and metallographic examinations, a technology for welding of intermetallic alloy with a subsequent local heat treatment was developed, which allows producing defect-free welded joints. 7 Ref., 4 Fig.

Keywords: intermetallic, electron beam welding, stresses, cold cracks, local heat treatment

Поступила в редакцію 31.07.2019

XII Международная выставка «UzMetalMashExpo-2020» Металлургия/Металлообработка/Станкостроение/Сварка

24–26 марта 2020 г.

Ташкент, Узбекистан



Сварка

- ▶ Оборудование и технологии для всех видов сварки, наплавки и пайки
- ▶ Оборудование и технологии для термической обработки
- ▶ Материалы для сварки, резки, наплавки, напыления, пайки
- ▶ Средства и методы защиты
- ▶ Контроль качества сварных соединений
- ▶ Инструменты и приспособления для сварки
- ▶ Научные разработки в области сварки
- ▶ Модернизация сварочных производств на промышленных предприятиях
- ▶ Энергосберегающие технологии сварочных и термических производств
- ▶ Автоматизация и роботизация технологических процессов
- ▶ Измерительная техника, техническая диагностика и неразрушающий контроль

www.ieg.uz

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ТОНКОЛИСТОВОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Р.А. Кректулева, Ю.Н. Сараев, В.М. Семенчук, Р.О. Черепанов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, РФ

Проведено численное моделирование тепловых процессов при формировании сварочной ванны в низколегированной стали под воздействием электрической дуги. Рассмотрены различные режимы горения дуги. Обнаружено качественное различие в распространении и диссипации тепловой энергии в зависимости от режимов. Исследованы механизмы самоорганизации тепловых структур, обусловленные сильно нелинейными теплофизическими свойствами низколегированной стали, режимами подачи в сварочную ванну тепловой энергии и особенностями ее диссипации на границах. Достоверность численной модели подтверждена экспериментально, что позволяет результаты компьютерных исследований рекомендовать для практического применения. Библиогр. 14, рис. 7.

Ключевые слова: сварной шов, зона контакта, тепловой поток, нелинейность теплофизических свойств, синергетика, самоорганизация, внутренняя структура

Тонколистовые низколегированные стали (толщиной до 3,5...4,0 мм), широко применяемые во многих отраслях промышленности, в соответствии с ГОСТ 14771-76 рекомендуется варить с использованием так называемых подкладок, которые крепятся в нижнем положении формирующегося сварного соединения. Роль подкладок — удерживать расплавленный металл от вытекания из сварочной ванны. В технической литературе закрепилось представление о том, что применение медных (реже алюминиевых) подкладок способствует отведению излишка теплоты за счет более интенсивной диссипации тепловой энергии, поэтому они получили название теплоотводящих или формирующих подкладок, влияющих не только на формирование металла шва, но и на его структуру непосредственно в зоне неразъемного соединения [1–3]. Идея применения медных подкладок по внешним признакам хорошо согласуется с теорией самоорганизации нелинейных систем, развиваемой школой лауреата Нобелевской премии по химии 1977 г. И.Р. Пригожина [4]. Общие представления о формировании сварного соединения с позиций самоорганизующихся систем изложены в работе [5]. В настоящее время отмеченное утверждение находит широкое применение при создании различных систем автоматического регулирования процессами сварки и наплавки [6–8].

Термин «самоорганизация» в современном научном языке означает процесс пространственно-временной структурной перестройки системы, в результате чего система приобретает новые качества, как правило, улучшающие ее функционирование в старых условиях. Возможны три сценария развития самоорганизации: порядок на основе порядка, порядок на основе хаоса и хаос на основе

порядка, его еще называют динамическим хаосом. В приложении к технологиям сварки самоорганизующейся системой является само сварное соединение, которое сформировано не хаотично (расплав–кристаллизация при любых режимах), а с учетом физической природы металла и строгим соблюдением баланса между притоком энергии в сварочную ванну и ее оттоком. Важность данного параметра показана в работе [9], где установлено, что скорость изменения температуры расплавленного металла оказывает доминирующее влияние на характер структурно-фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния. Правильное применение данной теории к сварочным технологиям позволило бы снять многие проблемы надежности сварных соединений, особенно их работы в критических условиях: высоких и низких температур, повышенного давления и других. Тем не менее, до сих пор в большинстве технологий остаются открытыми не только вопросы обнаружения механизмов, которые бы приводили технологическую систему в порядок, но и вопросы, связанные со способами исключения навязанного ей поведения, не свойственного принципам рационального функционирования.

Цель настоящей работы — разработать методику численного анализа механизмов самоорганизации тепловых процессов в сварочной ванне при электродуговой сварке тонколистовой низколегированной стали, экспериментально доказать ее достоверность на примере сварки стали Ст3 с использованием медных теплоотводящих подкладок.

Физическая и математическая постановки задачи. Формулирование исследовательских задач вытекает из рассмотрения особенностей тех-

нологии электродуговой сварки неплавящимся электродом в среде аргона. В зоне сварочной ванны вещество находится во всех четырех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном, плазменном. Одновременно с этим происходят различные превращения энергии: электромагнитные, тепловые, химические, механические, радиационные и внутриатомные. Особенность данного способа сварки заключается в том, что примерно 93...95 % энергии электрической дуги расходуются на процессы тепломассопереноса.

Схематично процесс сварки представлен на рис. 1. Свариваемые образцы одинаковых размеров размещают на медной подкладке. Электрод перемещается вдоль свариваемого стыка со скоростью v (указано стрелкой). Исследования проводили для стальных образцов длиной 60 и 120 мм, шириной 20 и 40 мм, соответственно, толщина варьировалась от 1,2 до 3,5 мм. Размеры медных подкладок по длине были такими же, как и стальные образцы или на 2 мм длиннее, толщины варьировались от 1 до 3 мм с шагом 0,5 мм. Ширину зазора между медными подкладками задавали: 0, 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 и 10,0 мм. Для проведения натурных экспериментов использовали установку на подвижной платформе. Горелку с электродом крепили в специальном держателе, имеющем функцию регулирования вылета. В момент зажигания дуги платформа приходила в движение. В конструкцию установки заложено управление длиной межэлектродного промежутка, вольт-амперными характеристиками источника питания и скоростью перемещения свариваемого образца.

На рис. 1 плоскости А, В и С, пересекающие образец перпендикулярно плоскости движения

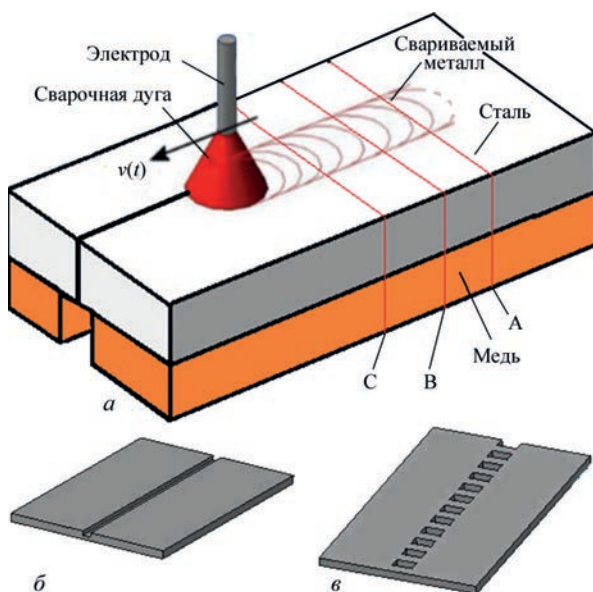


Рис. 1. Эскизное изображение сварки двух стальных пластин на медной теплоотводящей подкладке: а — с зазором; б — с канавкой; в — с перфорацией

электрода, выделены с целью дальнейших теоретических и экспериментальных исследований структурно-фазовых изменений получаемого сварного соединения и проверки адекватности модельных представлений.

Основы построения математической модели технологических процессов сварочного производства, включающей уравнения баланса, уравнение фазовых переходов и уравнение кинетики химических превращений, изложены в работе [10]. В соответствии с этой работой исходная система уравнений, моделирующая TIG-сварку, имеет следующий вид:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right); \quad (1)$$

$$L_k V_k = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n_{+0}} - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial n_{-0}}; \quad (2)$$

$$q(r) = \frac{\eta I(t)U(t)k}{\pi e^{kr^2}}. \quad (3)$$

В представленной системе уравнение (1) — пространственное динамическое уравнение теплопроводности, (2) — уравнение фазовых превращений, (3) — распределение плотности потока энергии плазменной дуги в зоне действия источника.

Система уравнений (1)–(3) дополнена начальными условиями

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (4)$$

Граничные условия заданы в виде:
– вне области действия источника

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) + \varepsilon \sigma (T_0^4 - T^4); \quad (5)$$

– в области действия источника

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\eta I U k}{\pi} \exp(-kr^2); \quad (6)$$

– в области контакта двух разнородных материалов

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial n}, \quad x, y, z \in S_{12}. \quad (7)$$

В системе уравнений (1)–(7) использованы следующие обозначения: T — температура; $\rho(T)$ — зависимость плотности от температуры; $C_p(T)$ — зависимость теплоемкости от температуры; t — время; x, y, z — пространственные координаты; $\lambda(T)$ — зависимость коэффициента теплопроводности от температуры; L_k — теплота фазового перехода (в том числе, плавление, испарение, кристаллизация); V_k — скорость движения

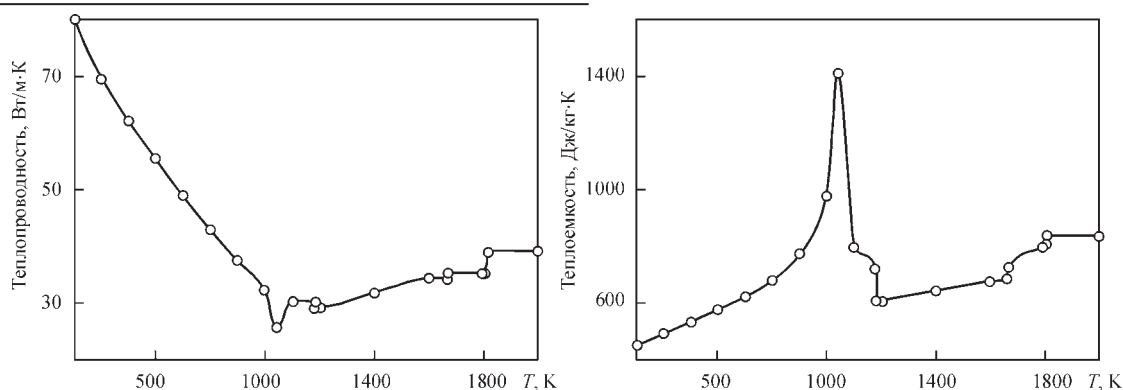


Рис. 2. Теплофизические свойства железа (и низколегированной стали)

фронта фазового перехода; n — вектор нормали к границе раздела фаз (индексы внизу \pm указывают на разные стороны от границы раздела); λ_s , λ_l — коэффициенты теплопроводности материала по разные стороны границы фазового перехода (в частности, твердой и жидкой фаз); r — радиус теплового пятна от горящей дуги; η и $k(L)$ — полуэмпирические параметры, характеризующиеся мощностью источника нагрева и ее распределение по тепловому пятну; L — длина межэлектродного промежутка; I — ток, U — напряжение электродугового источника; ε — степень черноты тела; $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана–Больцмана; α — коэффициент теплообмена с окружающей средой; λ_1 , λ_2 — коэффициенты теплопроводности контактирующих материалов; S_{12} — площадь контакта разнородных материалов. Горящая дуга движется по траектории, определяемой системой уравнений:

$$\begin{cases} x = x_0 + V_x t, \\ y = y_0, \end{cases} \quad (8)$$

где x_0 , y_0 — координаты начальной точки; V_x — скорость движения источника вдоль оси.

Математическая модель (1)–(8) дополнена экспериментальными зависимостями [11] теплофизических характеристик низколегированной стали (рис. 2) и диаграммой состояния «железо–углерод» [12]. Зная детальное распределение температуры в объеме свариваемых образцов, по диаграмме состояния в них можно установить растворимость углерода в соответствующих областях, что позволяет неявно учесть диффузионные процессы и определить области структурно-фазовых превращений (плавления, неполного расплавления, перегрева, нормализации и т.д.) в зоне сварного шва.

Поставленную задачу решали численно методом конечных разностей [13]. Шаг сетки в различных численных экспериментах варьировали от 0,2 до 0,5 мм, в зависимости от целей исследова-

ния. Предварительными расчетами было установлено, что при правильно выбранных режимах горения дуги тепловая энергия от источника локализуется в узкой полосе вдоль траектории движения дуги. Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности в рассматриваемых сталях в диапазоне температур 1000...1300 К имеет глубокий минимум, т. е. скорость передачи теплоты за границы этого диапазона незначительна, поэтому целесообразно ограничиться исследованием узких полосок шириной не более 20 мм. Также было установлено, что температурное поле стабилизируется по длине на расстоянии 6 мм от начала сварного соединения для образцов толщиной 1,2 мм. С ростом толщины это расстояние постепенно увеличивается до 20 мм для пластин 3,5 мм. Для дальнейшего исследования рассматриваемых стальных пластин ограничили размерами 60×20×2 мм каждая.

Ниже приведены результаты, показывающие, что рассматриваемая расчетная модель позволяет с хорошей точностью определить в объеме не только размеры сварного шва, но и все зоны структурно-фазовых переходов в результате многократных термических циклов «нагрев-охлаждение».

Результаты компьютерных экспериментов по сварке стальных пластин движущейся электрической дугой. Следует отметить, что рассмотренная выше математическая постановка задачи и современный уровень компьютерной техники позволяют достаточно точно (в пределах ошибки опыта 5...7 %) предсказать режимы горения дуги, которые бы обеспечили требуемые характеристики сварного шва и ЗТВ, но, кроме того, дополнительно извлечь еще большой объем информации, которую невозможно получить в прямых экспериментах. Применение приемов цифровой визуализации позволило детально проследить все стадии формирования сварного соединения: нагрев, плавление, испарение, охлаждение, конденсацию, кристаллизацию, фазовые переходы и сопутствующие им термомеханические изменения [13].

С этой целью использовали системный подход, разработанный в работе [10]. Было выделено 6 основных структурных уровней, по которым вели исследование:

- оценка влияния мощности источника нагрева на распределение плотности теплового потока в факеле горячей дуги;
- анализ процессов распределения тепловой энергии в свариваемых и теплоотводящих материалах;
- определение всех входных параметров системы, в той или иной степени влияющих на конечные свойства сварного соединения;
- оценка внутренней структуры материала сварного соединения по результатам компьютерного моделирования;
- управление процессами диффузии и структурообразования на стадии проектирования технологического процесса;

– определение критериев рациональной самоорганизации тепловых процессов в сварном соединении.

Первоначально рассмотрели пример сварки пластин на подкладке без зазора. Численно установили режимы горения дуги, обеспечивающие проплавление пластин толщиной 2 мм на всю глубину. На рис. 3 представлены температурные поля в два момента времени в двух областях: на поверхности сварочной ванны и в зоне контакта свариваемых пластин со сплошной медной подкладкой. На градуировочной температурной шкале верхнее значение указывает максимальную температуру в образце в данный момент времени, черта указывает на температуру в зоне контакта двух материалов. Из рисунков видно, что по мере движения источника нагрева максимальные температуры в зоне контакта дуги со стальной поверхностью (толщина слоя около 0,2 мм) растут: в начале процесса сварки температура $T = 3439$ К, а к середине образца $T = 3611$ К. Это существенно выше

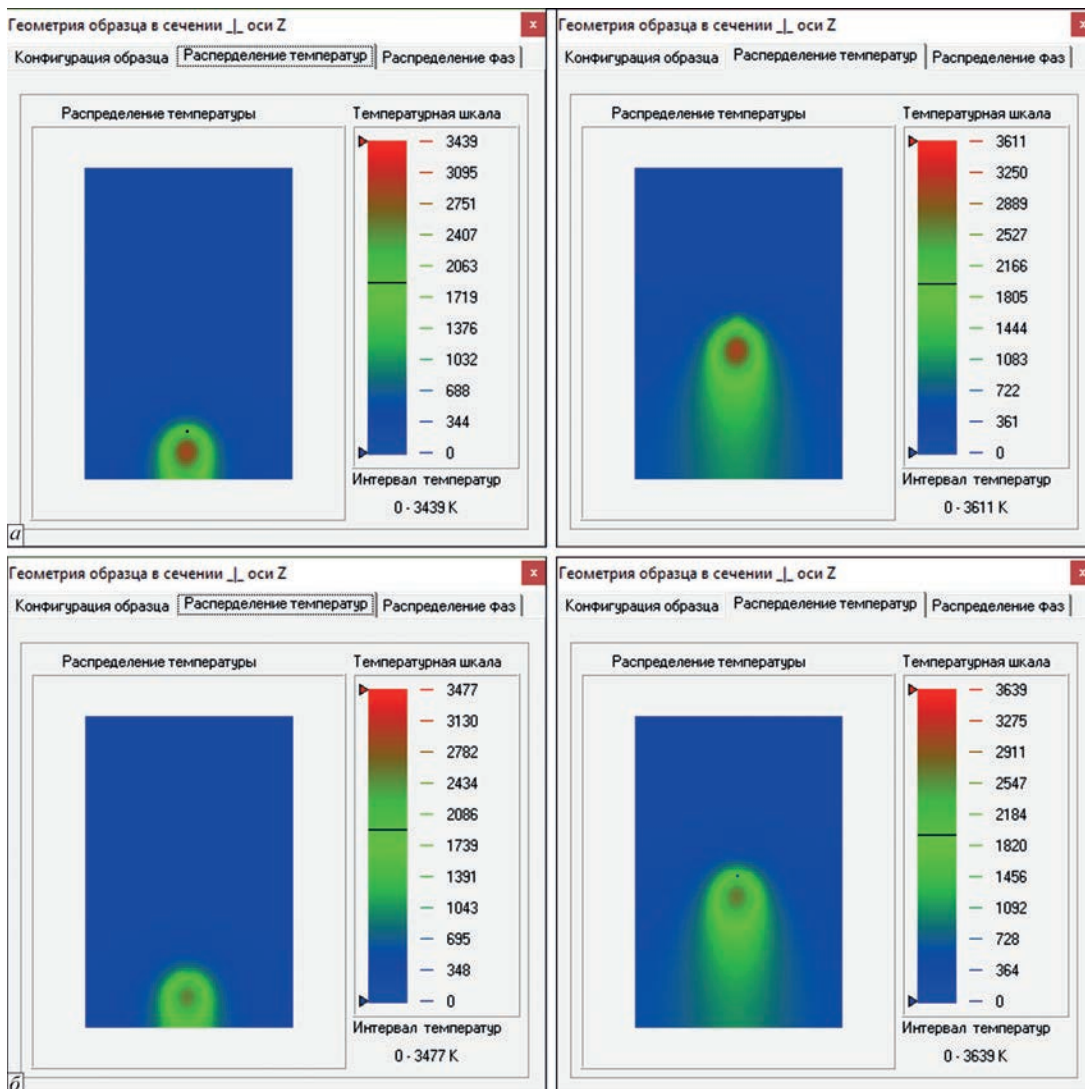


Рис. 3. Формирование температурных полей в разные моменты времени: а — на поверхности сварочной ванны; б — то же в зоне контакта свариваемых образцов с медной подкладкой

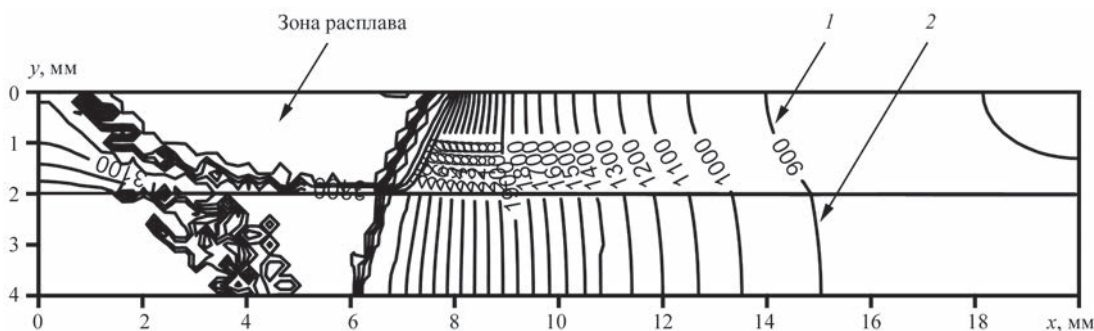


Рис. 4. Карта изолиний температур в осевом сечении сварочной ванны на 2-й секунде от начала сварки: 1 — стальной стык; 2 — медная подкладка

температуры плавления стали ($T = 1850$ К), в то время как в зоне контакта с медной подкладкой температура близка к температуре плавления стали. При выбранных режимах сварки наблюдается явный перегрев поверхности сварочной ванны. Снижение мощности ведет к неполному проплавлению. Причиной перегрева оказалась сама «теплоотводящая» подкладка. Это было установлено, исходя из анализа распространения изолиний температур в осевом сечении образца (рис. 4). Из рисунка видно, что благодаря высокой теплопроводности меди тепловой фронт в ней распространяется быстрее, чем в стали. За счет этого часть отведенной (диссипированной) из ванны энергии все время возвращается из подкладок назад в свариваемое изделие, подогревая его снизу. По наклону изолиний также можно сказать, что вначале они идут почти параллельно стенкам сварочной ванны под острым углом к зоне контакта. А затем в стальном образце постепенно изолинии меняют угол наклона на тупой. Низ ванны на удалении от источника нагрева становится более прогретым, чем верх.

Из этого примера видно, что основные требования теории самоорганизации И.Р. Пригожина для процесса сварки выполнены. Нелинейность теплофизических свойств стали и увеличение диссипации тепловой энергии через зону контакта с медью обеспечены. При этом наблюдается нарастающий перегрев сварочной ванны по мере движения горячей дуги. Из термодинамики известно, что с ростом температуры в системе растет ее энтропия, т. е. увеличивается хаотичность данной системы.

Таким образом, в рассматриваемом случае имеет место третий тип самоорганизации — возникновение хаоса из порядка. Порядком можно считать исходную структуру свариваемых материалов. Представляет интерес более подробно исследовать влияние исходной геометрии медной подкладки в зоне контакта со сварочной ванной. Были рассмотрены четыре разных варианта: уменьшение толщины сплошной подкладки, фор-

мирование канавки под местом стыка, образование зазора и нанесение перфорации.

Надо отметить, что численные расчеты, проведенные с использованием первых двух типов подкладок, показали, что в обоих случаях наблюдался заметный рост температуры поверхности по длине сварочной ванны, увеличивая тем самым неоднородность температурных полей и создавая управляемый динамический хаос в системе.

Идея применения подкладок с перфорацией (см. рис. 1, в) оказалась более плодотворной. Использовали медные пластины толщиной 2 мм. Через 3 мм набивали узкие прорезы размером 4×2 мм. Численными расчетами установлено, что температура поверхности практически одинакова по всей длине сварочной ванны, в то время, как на дне сварочной ванны температурные зависимости имеют ярко выраженный импульсный характер (рис. 5). В этом случае получаемый эффект подобен импульсно-дуговой сварке без подкладки [14]. Различие только в том, что при импульсно-дуговой сварке максимальный тепловой поток достигается в период импульса, а при сварке на постоянном токе с применением перфорированной подкладки — под зоной перфорации. Но в том и другом случаях температура внутри сварочной ванны быстро выравнивается, возникает самоорганизация тепловых процессов по типу «новый порядок из порядка». Однако, отметим, что применение перфорированных подкладок в массовом производстве невыгодно с экономической точки зрения, поскольку приводит к увеличению технологических затрат.

Наиболее рациональный способ самоорганизации по типу «новый порядок из порядка» может быть получен при сварке с применением медных подкладок с зазором.

В ходе компьютерных экспериментов были исследованы особенности формирования сварного соединения для всех типов подкладок, приведенных выше. Результаты расчетов показали, что для сварки пластин толщиной 2 мм наиболее приемлемыми оказались подкладки толщиной 2 мм

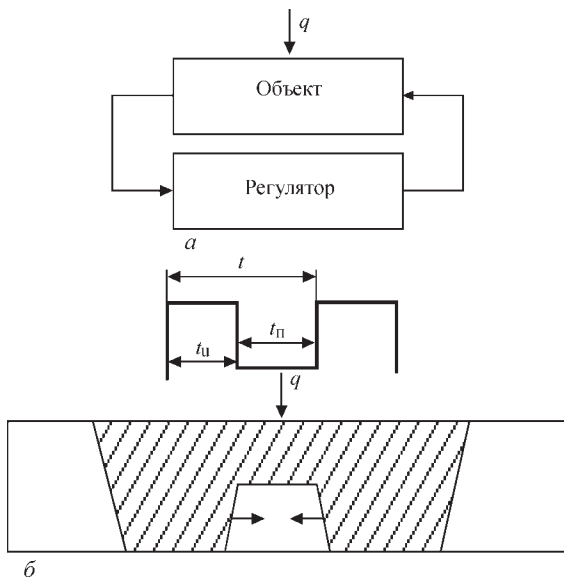


Рис. 5. Принципиальная схема распределения теплоты в сварочной ванне при сварке на перфорированной медной подкладке (а) и при импульсно-дуговой сварке (б): $t_{и}$ — время в импульсе; $t_{п}$ — время в паузе и при сварке

с зазором также 2 мм. Проиллюстрируем это на рис. 6, который отражает изменение температур по ширине и по глубине сварного соединения в сечениях на расстоянии 15 и 37,5 мм от лицевого торца (сечения А и С на рис. 1). В сечении В (25 мм от лицевого торца) получены аналогичные распределения температур, поэтому они не приведены в силу идентичности.

Данные распределения температур были рассчитаны при следующих режимах горения дуги: мощность $W = 1,26$ кВт, межэлектродное расстояние $d = 1,5$ мм, скорость сварки $v = 2,8$ мм/с, ширина зазора между медными подкладками $S = 2$ мм. На обоих графиках размеры сварного шва в верхнем и нижнем положениях практически одинаковы. Их определение поясним на примере рис. 6, б, где проведена еще одна дополнительная горизонтальная линия, отсекающая температуру плавления $T = 1850$ К на четырех верхних кривых, которые относятся к стальному образцу, остальные кривые относятся к медной подкладке.

Ширина отсеченных областей как раз и указывает размеры сварного шва по глубине: с лицевой стороны — 7,5 мм, с обратной стороны — 2,5 мм, что соответствует нормативным требованиям. Таким же образом, отмеряя на оси ординат температуры структурно-фазовых переходов низколегированных сталей (1523 К — неполного расплавления, 1273 К — перегрева, 1123 К — нормализации и т. д.), по ширине отсеченных областей можно установить размеры этих зон. Отметим, что по расчетным данным максимальные температуры по всей длине ванны расплава отличаются менее, чем на 100 градусов. При этом расчетное отклонение ширины сварного шва по всему образцу не превышает 0,5 мм. Таким образом, можно считать, что при данных условиях обеспечивается самоорганизация тепловых процессов по типу «новый порядок из порядка». Особую роль в этом играет правильный подбор ширины зазора медной подложки: узкий зазор или его отсутствие приводят к избыточному разогреву сварочной ванны по мере движения электрической дуги, широкий зазор не обеспечивает необходимый отток теплоты со дна сварочной ванны и не защищает ее от протекания (прожога).

Экспериментальная проверка достоверности результатов расчетов. Чтобы подтвердить правильность теоретических выводов и достоверность разработанной методики расчетов, провели экспериментальные исследования на сварном соединении из низкоуглеродистой стали СтЗсп. Была выполнена аргонодуговая сварка неплавящимся электродом на медной подкладке (с зазором 2 мм), полностью соответствующая компьютерному эксперименту. Эксперимент проводили при комнатной температуре ($T = 300$ К) с последующим охлаждением сварного соединения в естественной воздушной среде. Предварительно экспериментальную установку протестировали для определения полуэмпирических параметров модели η и $k(L)$, в результате чего получили значения: $\eta = 0,9$; $k(L) = 8$.

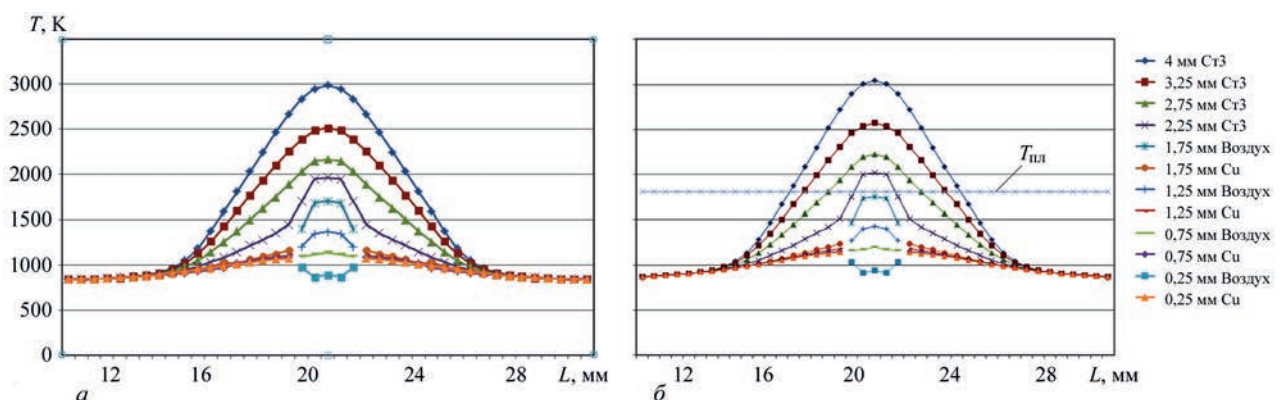


Рис. 6. Распределение температур в поперечном сечении на расстоянии 15 (а) и 37,5 мм (б) от начала сварного шва

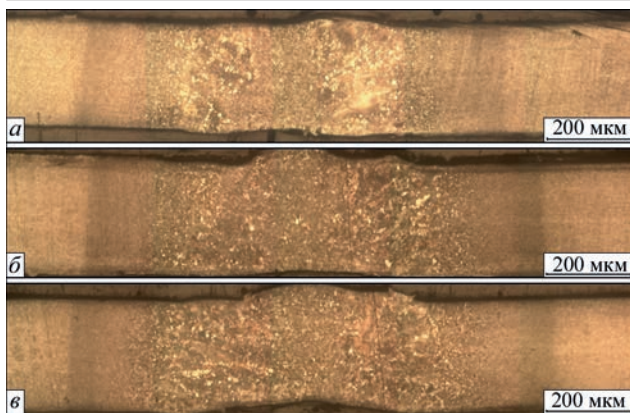


Рис. 7. Макроструктура сварного соединения в поперечных сечениях, выполненных на расстоянии: а — 15; б — 25; в — 37,5 мм от начала сварного соединения

Из эксперимента получили, что ширина сварного шва (непосредственно зоны сплавления) в верхнем и нижнем положениях с точностью до 0,5 мм совпадает с расчетной. Металлографические исследования проводили на образцах, вырезанных из сваренных пластин, расположенных в зонах: 15, 25 и 37,5 мм от начала сварного соединения. Структура зон сварных соединений изучалась с применением микроскопа Olympus – GX51 и комплекта прикладных программ SIAMS 700. Характерные особенности структуры сварного соединения представлены на рис. 7.

Обращает внимание однородность структуры по глубине и ширине сварного соединения как в области сварного шва, так и в зонах структурно-фазовых переходов. Несмотря на то, что ширина сварного шва и в расчетах, и в эксперименте сужается книзу более чем в 2 раза, макроструктура не отражает этого факта, поскольку ее размеры практически не изменяются по толщине.

В этом проявляется одно из положительных качеств технологии сварки на теплоотводящих медных подкладках с зазором. Здесь, по-видимому, сказывается эффект предварительного подогрева, осуществляемый за счет быстрой диссипации тепловой энергии из зоны сварки и передачи ее через медную подкладку нижним слоям стальных пластин. Таким образом, происходит управление процессами самоорганизации металлографических структур и упорядочивание их по толщине сварного соединения.

Выводы

1. Проведен численный анализ динамики тепловых процессов в сварочной ванне при электродуговой сварке тонколистовой низколегированной стали и проведены экспериментальные исследования, подтверждающие достоверность численных расчетов и выводов на их анализе.

2. Обнаружено, что при выполнении нормативных требований с использованием медных подкладок возможны два типа процессов самоорганизации: новый порядок на основе порядка и управляемый динамический хаос на основе порядка. Второй тип процессов самоорганизации в литературе по сварке до сих пор не обсуждался и нуждается в дополнительных исследованиях.

3. Исследованы механизмы самоорганизации и управления внутренней структурой материала, приводящие технологическую систему в порядок и позволяющие исключить навязанное ей поведение, не свойственное принципам рационального управления.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ №16-19-10010П в соответствии с планом работ 2019 г. Авторы выражают искреннюю благодарность Табанову А.М. за участие в выполнении исследований.

Список литературы

1. Калюжный В.В. (1992) *Медная подкладка*. СССР Пат. 1745489: МПК В23 К37/06. № 4799796/08.
2. Чан Туан Анъ. (1996) *Формирование корня шва при односторонней сварке стыковых соединений с помощью медных подкладок*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев.
3. Атрошенко В.В., Бычков В.М., Никифоров Р.В. и др. (2012) Численное моделирование формы проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на медной подкладке. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 16, 8(53), 89–93.
4. Nikolis, G., Prigogine, I. (1977) *Self-organization in Nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. New York, John Wiley.
5. Zuev I.V., Galkin A.G., Bushma V.O. (1995) Self-Organisation in Certain Processes of Welding and Processing Materials. *Journal of Advanced Materials*, B2, 70–74.
6. Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселев А.С. и др. (2018) Комплекс для исследования процессов дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, 8, 15–23.
7. Lebedev V.A. (2015) Mechanized and automatic synergic welding with pulsed electrode wire feed. *Welding International*, 29, 2, 140–144.
8. Starke G., Hahn D., Diana G. et al. (2016) Self-organization and Self-coordination in Welding Automation with Collaborating Teams of Industrial Robots. *Machines*, 4, 23.
9. Ефименко Л.А., Рамусь А.А., Меркулова А.О. (2015) Особенности распада аустенита в зоне термического влияния при сварке высокопрочных сталей. *Физика металлов и металловедение*, 116, 5, 520–529.
10. Кректулева Р.А., Безгинов Р.О., Черепанов О.И., Черепанов Р.О. (2015) Исследование теплофизических процессов в контактирующей паре материалов Ст3-А1 при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом. *Физическая мезомеханика*, 18, 3, 92–100.
11. Зиновьев В.Е. (1989) *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах*. Справ. изд. Москва, Металлургия.
12. Лякишев Н.П. (1996) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*: справочник. В 3 т. Т.1 Лякишев Н.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
13. Krektuleva R.A., Cherepanov O.I., Cherepanov R.O. (2017) Numerical Investigation of Residual Thermal Stresses in Welded Joints of The Heterogeneous Steels With Account

of Technological Features of Multi-Pass Welding. *Applied Mathematical Modelling*, **42**, 244–256.

14. Бежин О.Н., Косяков В.А., Кректулева Р.А. (1998) Формирование тепловых локализованных структур в сварном шве при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом. *Прикладная механика и теоретическая физика*, **39**, **6** (232), 172–177.

References

1. Kalyuzhny, V.V. (1992) Copper backing. USSR Pat. 1745489, Int. Cl. B23K37/06, No. 4799796/08 [in Russian].
2. Chan Tuan An (1996) Formation of weld root in one-sided welding of butt joints using copper backings. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kiev* [in Russian].
3. Atroshchenko, V.V., Bychkov, V.M., Nikiforov, R.V. et al. (2012) Numerical modeling of penetration shape in consumable electrode argon-arc welding on copper backing. *Vestnik Ufimskogo GATU*, **16**, 8(53), 89–93 [in Russian].
4. Nikolis, G., Prigogine, I. (1977) *Self-organization in Nonequilibrium systems*: From dissipative structures to order through fluctuations. New York, John Wiley.
5. Zuev, I.V., Galkin, A.G., Bushma, V.O. (1995) Self-organization in certain processes of welding and processing materials. *J. of Advanced Materials*, **B2**, 70–74.
6. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Kiselev, A.S. et al. (2018) Complex for investigation of arc welding processes. *The Paton Welding J.*, **8**, 13–21.
7. Lebedev, V.A. (2015) Mechanized and automatic synergic welding with pulsed electrode wire feed. *Welding Int.*, **29**(2), 140–144.
8. Starke, G., Hahn, D., Diana G. et al. (2016) Self-organization and self-coordination in welding automation with collaborating teams of industrial robots. *Machines*, **4**, 23.
9. Efimenko, L.A., Ramus, A.A., Merkulova, A.O. (2015) Peculiarities of austenite decay in heat-affected zone in welding of high-strength steels. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **116** (5), 520–529 in Russian].
10. Krektuleva, R.A., Bezginov, R.O., Cherepanov, O.I., Cherepanov, R.O. (2015) Investigation of thermophysical processes in contacting pair of materials St3-Al in consumable electrode argon-arc welding. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, **18**(3), 92–100 [in Russian].
11. Zinoviev, V.E. (1989) *Thermophysical properties of metals at high temperatures*: Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Lyakishev, N.P. (1996) *State diagrams of binary metallic systems*: Refer. book. In: 3 Vol. Vol. 1. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
13. Krektuleva, R.A., Cherepanov, O.I., Cherepanov, R.O. (2017) Numerical investigation of residual thermal stresses in welded joints of the heterogeneous steels with account of technological features of multi-pass welding. *Applied Mathematical Modelling*, **42**, 244–256.
14. Bezgin, O.N., Kosyakov, V.A., Krektuleva, R.A. (1998) Formation of thermal localized structures in weld during consumable electrode pulsed-arc welding. *PMTF*, **39**, **6** (232), 172–177 [in Russian].

ДИНАМІКА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОЛИСТОВОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Р.О. Кректульова, Ю.М. Сараєв, В.М. Семенчук, Р.О. Черепанов

Інститут фізики міцності та матеріалознавства СВ РАН. 634050, м. Томськ, просп. Академічний 2/4, РФ

Проведено чисельне моделювання теплових процесів при формуванні зварювальної ванни в низьколегованій сталі під впливом електричної дуги. Розглянуто різні режими горіння дуги. Виявлено якісну відмінність в поширенні та дисипації теплової енергії в залежності від режимів. Досліджено механізми самоорганізації теплових структур, зумовлені сильно нелінійними теплофізичними властивостями низьколегованої сталі, режимами подачі в зварювальну ванну теплової енергії та особливостями її дисипації на границях. Достовірність чисельної моделі підтверджена експериментально, що дозволяє результати комп'ютерних досліджень рекомендувати для практичного застосування. Бібліогр. 14, рис. 7.

Ключові слова: зварний шов, зона контакту, тепловий потік, нелінійність теплофізичних властивостей, синергетика, самоорганізація, внутрішня структура

DYNAMICS OF THERMAL PROCESSES IN WELDING SHEET LOW-ALLOYED STEEL

R.A. Krektuleva, Yu.N. Saraev, V.M. Semenchuk, R.O. Cherepanov

Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, 3/4 Akademicheskoy Ave., 634050, Tomsk, RF

Numerical modeling of thermal processes in weld pool formation in low-alloyed steel under the impact of the electric arc was performed. Different arcing modes are considered. A qualitative difference in propagation and dissipation of thermal energy is found, depending on the modes. Mechanisms of self-organization of thermal structures were studied, which are due to highly non-linear thermophysical properties of low-alloyed steel, modes of thermal energy feeding into the weld pool and features of its dissipation on the boundaries. The validity of the numerical model is confirmed experimentally, that allows recommending the results of computer studies for practical application. 14 Ref., 7 Fig.

Keywords: weld, contact zone, heat flow, non-linearity of thermophysical properties, synergism, self-organization, internal structure

Поступила в редакцію 08.07.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, А.Н. Кислица, Е.К. Кузьмич-Янчук, С.Н. Калужный

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

Проведено исследование вольт-амперных характеристик и определен термический КПД плазмотрона МП-04 установки микроплазменного напыления МПН-004 в условиях формирования ламинарной аргоновой микроплазменной струи. Была определена область рабочих напряжений плазмотрона и построено семейство вольт-амперных характеристик, каждая из которых была снята при неизменных составе и расходе рабочего газа, длине открытого участка дуги и неизменных конструктивных размерах плазмотрона. Анализ результатов эксперимента показывает, что вольт-амперные характеристики плазмотрона МП-04 являются восходящими и имеют линейный вид. Установлено, что при рабочих значениях силы тока и расхода плазмообразующего газа напряжение находится в пределах 22...32 В. Методом проточного калориметрирования теплового потока были определены термический КПД плазмотрона, среднемассовая начальная энтальпия и температура плазменной струи в зависимости от тока дуги и расхода плазмообразующего газа. Было установлено, что в условиях процесса микроплазменного порошкового напыления термический КПД плазмотрона находится в диапазоне 30...55 % и при расходах газа, превышающих 40 л/ч, практически не изменяется с изменением силы тока. Библиогр. 16, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, аргоновая плазменная струя, вольт-амперная характеристика плазмотрона, температура и энтальпия плазменной струи, термический КПД, напряжение и сила тока плазменной дуги, расход плазмообразующего газа

В настоящее время в промышленности все шире применяются процессы газотермического нанесения покрытий. Одним из основных методов газотермического нанесения покрытий является плазменное напыление. Наиболее часто для этой цели используются плазмотроны, генерирующие турбулентную плазменную струю с электрической мощностью до 200 кВт и диаметром пятна напыляемого материала 15...30 мм. Применение таких плазмотронов для напыления деталей малых размеров или тонкостенных деталей может привести к их перегреву и короблению в виду высокой тепловой мощности плазменной струи. Кроме того, в случае напыления малоразмерных деталей или локальных участков поверхности (5...10 мм и менее) возникают большие потери напыляемого материала, а также возникает необходимость в дополнительной операции по маскированию участков, не подлежащих напылению. Эти обстоятельства привели к разработке в ИЭС им. Е.О. Патона нового способа газотермического нанесения покрытий — микроплазменного напыления (МПН) [1, 2].

Для реализации метода микроплазменного напыления в ИЭС им. Е.О. Патона был разработан и запатентован микроплазмотрон с выносным, непосредственно охлаждаемым анодом с эрозион-

но-стойкой вставкой [3]. Мощность разработанного микроплазмотрона МП-04 до 2,5 кВт.

Особенностью процесса микроплазменного напыления в случае нанесения покрытия из порошковых материалов является ламинарный режим истечения струи с использованием соосного обдува плазменной струи аргоном для ее стабилизации.

При разработке технологии микроплазменного напыления покрытий с использованием в качестве напыляемого материала порошка необходимо было исследовать как характеристики микроплазмотрона МП-04, так и параметры генерируемой им микроплазменной струи. В работе исследовали такие энергетические характеристики как тепловой КПД плазмотрона (η), зависимость напряжения дугового разряда от тока при изменении расходов газа — вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги, энтальпия (ΔH) и температура плазмы.

Методика проведения исследований. Методика проточного калориметрирования теплового потока, использованная для определения характеристик микроплазмотрона МП-04 применительно к условиям МПН из проволоочных материалов, изложена в работе [4]. Главное отличие в работе плазмотрона для напыления порошковых материалов состоит в режиме истечения плазмен-

ной струи. Известно, что напряжение плазменной дуги зависит от конструкции плазмотрона, тока дуги, состава и расхода рабочего газа. В связи с этим снятие ВАХ проводили при неизменных составе и расходе рабочего газа, длине открытого участка дуги и неизменных конструктивных размерах плазмотрона: диаметре канала плазмформирующего сопла 1,0 мм, диаметре электрода 1,5 мм, расстоянии от конца электрода до торца сопла 1,0 мм, расстоянии от торца сопла до анода 1,5 мм. В качестве плазмобразующего и защитного газа использовали аргон. Расход плазмобразующего газа изменяли в пределах 40...120 л/ч, расход защитного газа во всех опытах поддерживали равным 240 л/ч.

Основными тепловыми характеристиками плазмотрона являются его термический КПД ($\eta_{тр}$), энтальпия (ΔH) и температура плазменной струи.

Измерение ВАХ микроплазмотрона МП-04 при напылении порошковых материалов. ВАХ позволяет установить диапазон устойчивой работы источника питания при изменении режимов работы плазмотрона. Для определения области рабочих напряжений плазмотрона МП-04 было построено семейство ВАХ (рис. 1).

Обработка результатов эксперимента показывает, что ВАХ плазмотрона МП-04 являются восходящими и имеют линейный вид. Подобные ВАХ также были получены и при исследовании ламинарного плазмотрона в работе [5]. Из работы [6] следует, что восходящие ВАХ в большинстве случаев являются более энергетически выгодными, так как при использовании источников питания не требуют введения в цепь дополнительного балластного сопротивления, падение напряжения на котором может достигать 50 %. Таким образом, восходящие ВАХ микроплазмотрона МП-04 позволяют использовать с ним источники питания как с крутопадающей внешней ВАХ, так и с жесткой внешней ВАХ [7].

Установлено, что при неизменном расстоянии катод-анод и неизменном составе газа напряжение повышается с увеличением силы тока и расходом плазмобразующего газа (рис. 1, 2), тем са-

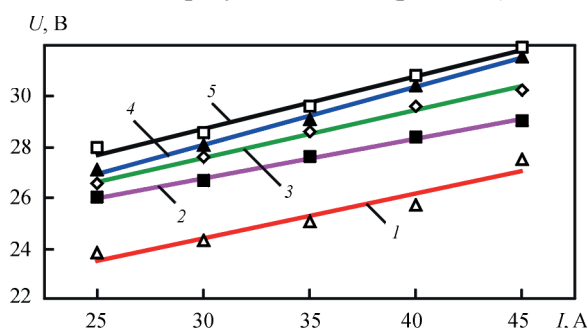


Рис. 1. ВАХ плазмотрона МП-04. Расход плазмобразующего газа: 1 — 40 л/ч; 2 — 60; 3 — 80; 4 — 100; 5 — 120

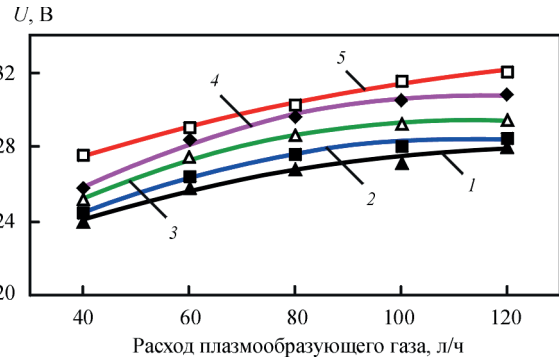


Рис. 2. Изменение напряжения столба дуги плазмотрона МП-04 в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

мым увеличивается мощность плазмотрона. Рост напряжения при увеличении расхода рабочего газа можно объяснить увеличением степени сжатия столба дуги. При обдуве дугового разряда на его границе за счет интенсивного теплообмена между газом и столбом дуги происходит процесс деионизации, что приводит к сокращению диаметра разряда и росту напряженности электрического поля в нем. Чем интенсивнее обжата дуга, тем при меньшем значении тока ее ВАХ переходит в возрастающую.

Из ВАХ (рис. 1) видно, что для рабочих значений силы тока и расхода плазмобразующего газа напряжение находится в пределах 22...32 В. Используя зависимость, приведенную в работе [8], можно принять, что источник питания для возбуждения дуги и устойчивой работы плазмотрона МП-04 должен обеспечивать возможность плавного регулирования тока в диапазоне 20...60 А и напряжение холостого хода не менее 60 В.

Определение термического КПД плазмотрона, мощности, энтальпии и температуры аргонной плазменной струи при микроплазменном напылении. Рост напряжения при увеличении расхода плазмобразующего газа приводит к линейному увеличению как мощности дуги (рис. 3), так и термического КПД плазмотрона (рис. 4), определяемого согласно [4].

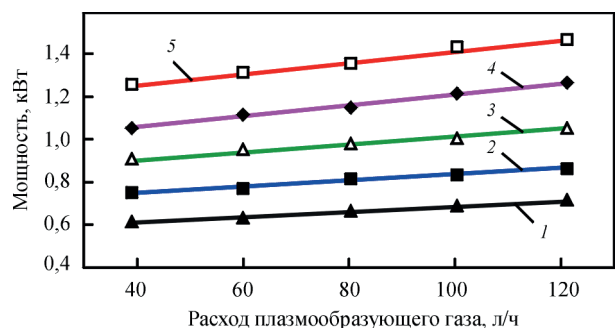


Рис. 3. Изменение мощности плазмотрона МП-04 в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

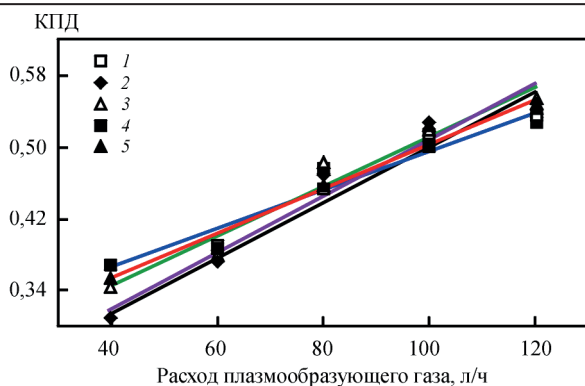


Рис. 4. Изменение термического КПД плазмотрона МП-04 в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 45 А; 2 — 40; 3 — 35; 4 — 30; 5 — 25

Полученный термический КПД микроплазмотрона МП-04 при данных параметрах работы находится в диапазоне 30...55 %. Термический КПД плазмотронов без межэлектродной вставки, применяемой при традиционном плазменном напылении с использованием аргона, по литературным данным и рассчитанный с помощью пакета прикладных программ для компьютерного моделирования процесса плазменного напыления CASPSP составляет 50...70 % [9].

Рост КПД микроплазмотрона МП-04 при увеличении расхода плазмообразующего газа объясняется уменьшением потерь тепла из столба дуги в стенки сопла в результате повышения степени сжатия столба дуги и, как следствие, улучшения тепловой изоляции их от столба дуги, а также за счет более интенсивного охлаждения газовым потоком анода. Таким образом, чем больше расход газа, тем меньше тепловая нагрузка на сопло, а следовательно выше ресурс работы сопла.

Однако так как рост напряжения, а следовательно, и мощности струи, происходит менее интенсивно, чем рост расхода газа, то значения энтальпии и температуры снижаются с повышением расхода газа (рис. 5). При этом максимальная расчетная энтальпия 32000 Дж/л наблюдается при минимальном расходе газа (40 л/ч) и максималь-

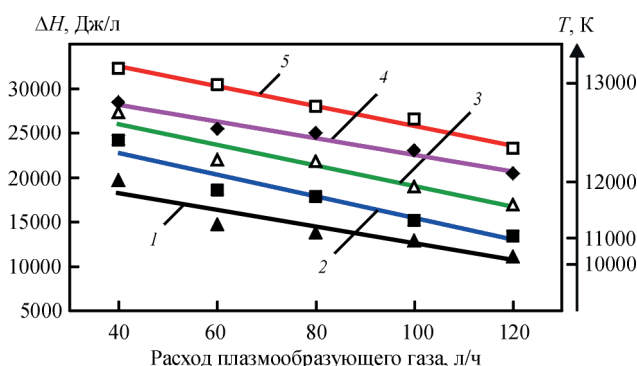


Рис. 5. Изменение энтальпии в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

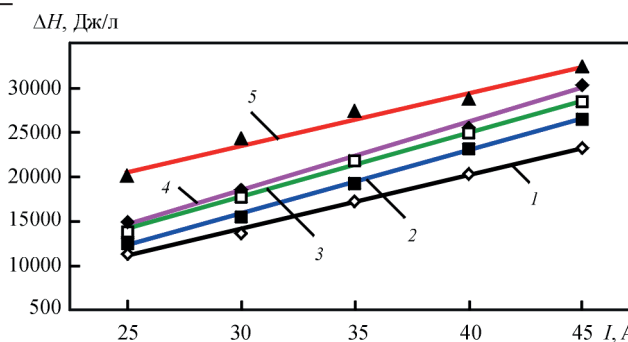


Рис. 6. Изменение энтальпии в зависимости от силы тока при разных значениях расхода плазмообразующего газа: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

ной силе тока (45 А), а минимальная расчетная энтальпия 11000 Дж/л наблюдается при максимальном расходе газа (120 л/ч) и минимальной силе тока (25 А).

Исходя из данных о зависимости температуры аргона от энтальпии [10], температура микроплазменной струи составляет 10000...13500 К. По литературным данным и расчетам, проведенным с помощью CASPSP для традиционного плазменного напыления, начальная температура аргоновой плазмы, выходящей из сопла, составляет 7000...13000 К [7, 11–15].

При фиксированном напряжении мощность дуги можно регулировать более гибким параметром — силой тока дуги. Энтальпия струи с увеличением силы тока, а следовательно и мощность дуги, возрастает линейно при всех расходах газа (рис. 6).

Поскольку напряжение в основном определяется конструкцией плазмотрона и составом плазмообразующего газа, то при напылении покрытия из порошкового материала выбор режима работы плазмотрона заключается в установлении оптимальной комбинации силы тока и расхода плазмообразующего газа. Нижний и верхний уровень расхода плазмообразующего газа связан с условиями работы микроплазмотрона (тепловой нагрузкой на стенки сопла, стойкостью анода, стабильностью процесса).

Проведенные исследования показали, что КПД плазмотрона МП-04 практически не изменяется с изменением силы тока при расходах газа, превышающих 40 л/ч (рис. 7). Снижение КПД плазмотрона при увеличении силы тока в случае расхода газа 40 л/ч связано с увеличением потерь в стенки сопла вследствие недостаточного сжатия дуги.

Оценка потерь мощности на излучение открытым участком столба микроплазменной дуги была проведена с использованием формулы (3) [4].

Результаты расчетной оценки величины объемных потерь мощности аргоновой плазмы атмосферного давления на излучение приведены в таблице.

Величины объемных потерь мощности аргоновой плазмы атмосферного давления на излучение

(\bar{T}) , кК	10	11	12	13	14	15	16
$\Psi, \cdot 10^{10}$ Вт/м ³	0,0033	0,011	0,030	0,062	0,096	0,118	0,124

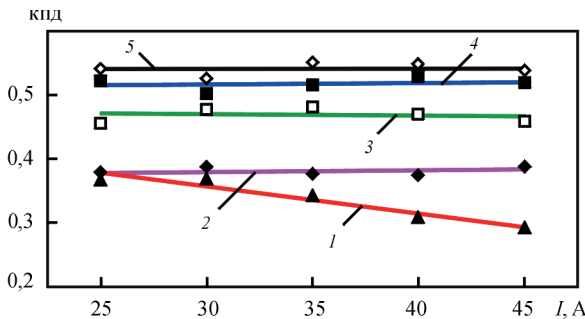


Рис. 7. Изменение термического КПД плазматрона МП-004 в зависимости от силы тока при разных значениях расхода плазмообразующего газа. Расход плазмообразующего газа: 1 — 40 л/ч; 2 — 60; 3 — 80; 4 — 100; 5 — 120

В случае, когда длина открытого участка — 3 мм, диаметр столба плазмы струи — 1 мм, среднемассовая температура плазмы $(\bar{T}) = 13$ кК, потери мощности на излучение составят 1,46 Вт, что соответствует приблизительно 0,1 % мощности дуги.

Данные результатов экспериментов по измерению излучения аргоновой плазмы, приведенные в [16], показывают, что при температуре около 13500 К поправка на излучение составляет около 2 %.

Выводы

1. В результате измерения электрических и тепловых характеристик ламинарной микроплазменной аргоновой струи, применяемой при микроплазменном напылении порошковыми материалами, были определены вольт-амперные характеристики плазматрона МП-04. Показано, что они имеют линейный вид и являются восходящими, при этом рабочее напряжение дуги в диапазоне токов 25...45 А составляет 22...32 В.

2. Установлено, что термический КПД микроплазматрона МП-04 в диапазоне токов 25...45 А возрастает с увеличением расхода плазмообразующего газа. Максимальный КПД достигает 55 % при расходе газа 120 л/ч. КПД плазматрона практически не изменяется с изменением силы тока при расходах газа, превышающих 40 л/ч. Увеличение силы тока при расходе газа 40 л/ч приводит к снижению КПД плазматрона, что связано с увеличением потерь в стенке сопла вследствие недостаточного сжатия дуги.

3. Установлено, что расчетная величина энтальпии плазменной струи в этих условиях достигает 32 кДж/л, а максимальная расчетная темпе-

ратура микроплазменной струи аргона в рабочем диапазоне микроплазматрона МП-04 составляет 13500 К. Таким образом, за счет увеличенного отношения мощности дуги к расходу плазмообразующего газа в случае микроплазменного напыления (порядка 2 кВт), по сравнению с традиционным плазменным напылением (порядка 1 кВт), температура микроплазменной струи мощностью 1,5 кВт во многих случаях оказывается выше температуры плазменной струи, генерируемой традиционными плазматронами мощностью 10...40 кВт.

Список литературы

1. Borisov Yu., Borisova A., Pereverzev Yu., Ramaekers P.P.J. (1997) Microplasma spraying. *Proc. of the 5th Europ. Conf. on Advanced Material and Processes – Netherlands*, сс. 237–241.
2. Борисов Ю.С., Переверзев Ю.Н., Бобрик В.Г., Войнарович С.Г. (1999) Нанесение узкополосных покрытий способом микроплазменного напыления. *Автоматическая сварка*, **6**, 53–55.
3. Борисов Ю.С., Войнарович С.Г. та ін. (2002). *Плазматрон для напылення покриттів*, Україна, Пат. № 2002076032UA, B23K10/00.
4. Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н. и др. (2018) Исследование электрических и энергетических характеристик плазматрона при микроплазменном напылении проволоочными материалами. *Автоматическая сварка*, **9**, 23–28.
5. Жеенбаев Ж., Энгельшт В. С. (1975) *Ламинарный плазматрон*. Фрунзе, Илим.
6. Коротеев А.С. (1980) *Электродуговые плазматроны*. Москва, Машиностроение.
7. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А. и др. (1987) *Газотермические покрытия из порошковых материалов*. Киев, Наукова думка.
8. Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др. (1979) *Микроплазменная сварка*. Киев, Наукова думка.
9. (2007) Программное обеспечение CASPSP-3.12 для компьютерного моделирования процесса плазменного напыления. *Автоматическая сварка*, **5**, 5–6.
10. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. (1990) *Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма*. Т.1. Новосибирск, Наука. Сиб. Отд-ние.
11. Грей Дж., Джекобс П. (1964) *Ракетная техника и космонавтика*, **3**, 25.
12. Ельяшевич М.А. (1970) *Вопросы физики низкотемпературной плазмы*. Минск, Наука и техника.
13. Абдразаков А., Жеенбаев Ж., Карих Ф.Г. (1968) *Исследование электрической дуги и плазматрона*. Фрунзе, Илим.
14. Краснов А.Н., Зильберберг В.Т., Шаривкер С.Ю. (1970) *Низкотемпературная плазма в металлургии*. Металлургия.
15. Моренов А.И., Петров А.В. (1967.) Определение скоростей и пульсаций струи в плазматронах для нанесения покрытий. *Сварочное производство*, **2**, 3–6.
16. Tankin R.S., Berry J.M. (1964) Experimental investigation of radiation from an argon. *Phys. of Fluids*, **7**, 1620–1624.

References

1. Borisov, Yu., Borisova, A., Pereverzev, Yu., Ramaekers, P.P.J. (1997) Microplasma spraying. In: *Proc. of 5th Europ. Conf. on Advanced Material and Processes. Netherlands*, 237–241.
2. Borisov, Yu.S., Pereverzev, Yu.N., Bobrik, V.G., Vojnarovich, S.G. (1999) Deposition of narrow-strip coatings by microplasma spraying method. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 53–55 [in Russian].

3. Borisov, Yu.S., Voinarovych, S.G. et al. (2002) *Plasmatron for coating deposition*. Pat. Ukraine 2002076032UA, Int. Cl. B23K10/00 [in Ukrainian].
4. Borisov, Yu.S., Kyslytsia, O.M., Voinarovych, S.G. et al. (2018) Investigation of plasmatron electric and energy characteristics in microplasma spraying with wire materials. *The Paton Welding J.*, **9**, 18-22.
5. Zheenbaev, Zh., Engelsht, V.S. (1975) *Laminar plasmatron*. Frunze, Ilim [in Russian].
6. Koroteev, A.S. (1980) *Electric arc plasmatrons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Borisov, Yu.S., Kharlamov, Yu.A. et al. (1987) *Thermal coatings of powder materials*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Paton, B.E., Gvozdetzky, V.S., Dudko, D.A. et al. (1979) *Microplasma welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
9. (2007) Software CASPSP-3.12 for computer modeling of plasma spraying process. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 5-6.
10. Engelsht, V.S., Gurovich, V.Ts., Desyatkov, G.A. et al. (1990) *Theory of electric arc column. Low-temperature plasma*. Vol. 1. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
11. Grey, J., Jekobs, P. (1964) *Rocket technique and cosmonautics*, **3**, 25.
12. Elyashevich, M.A. (1970) *Problems of physics of low-temperature plasma*. Minsk, Nauka i Tekhnika [in Russian].
13. Abdrazakov, A., Zheenbaev, Zh., Karikh, F.G. (1968) *Investigation of electric arc and plasmatron*. Frunze, Ilim [in Russian].
14. Krasnov, A.N., Zilberberg, V.T., Sharivker, S.Yu. (1970) *Low-temperature plasma in metallurgy*. Metallurgiya [in Russian].
15. Morenov, A.I., Petrov, A.V. (1967) Determination of velocities and pulsations of jet in plasmatrons for coating deposition. *Svaroch. Proizvodstvo*, **2**, 3-6 [in Russian].
16. Tankin, R.S., Berry, J.M. (1964) Experimental investigation of radiation from an argon. *Phys. of Fluids*, **7**, 1620-1624.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, А.Н. Кислиця, Є.К. Кузьмич-Янчук, С.Н. Калюжний

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

Проведено дослідження вольт-амперних характеристик і визначено термічний ККД плазматрона МП-04 установки мікроплазмового напилення МПН-004 в умовах формування ламінарного аргонного мікроплазмового струменя. Була визначена область робочих напруг плазматрона і побудовані вольт-амперні характеристики, кожна з яких була знята при незмінних складі та витраті робочого газу, довжині відкритої ділянки дуги і незмінних конструктивних розмірах плазматрона. Аналіз результатів експерименту показує, що вольт-амперні характеристики плазматрона МП-04 є висхідними і мають лінійний вигляд. Встановлено, що при робочих значеннях сили струму і витрати плазмоутворюючого газу напруга знаходиться в межах 22...32 В. Методом проточного калориметрування теплового потоку були визначені термічний ККД плазматрона, середньомасова початкова ентальпія і температура плазмового струменя в залежності від струму дуги і витрати плазмообразуючого газу. Було встановлено, що в умовах процесу мікроплазмового порошкового напилення термічний ККД плазматрона знаходиться в діапазоні 30...55 % і при витратах газу, що перевищують 40 л/год, практично не змінюється зі зміною сили струму. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: мікроплазмове напилення, аргонний плазмовий струмінь, вольт-амперна характеристика плазматрона, температура і ентальпія плазмового струменя, термічний ККД, напруга і сила струму плазмової дуги, витрата плазмоутворюючого газу

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF PLASMATRON FOR MICROPLASMA SPRAYING OF COATINGS FROM POWDER MATERIALS

Yu.S. Borisov, S.G. Voinarovych, A.N. Kyslytsa, E.K. Kuzmich-Yanchuk, S.N. Kalyuzhny

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The volt-ampere characteristics were studied and the coefficient of thermal efficiency of the MP-04 plasmatron for the installation of microplasma spraying MPN-004 was determined under the conditions of formation of a laminar argon microplasma jet. The region of operating voltages of the plasmatron was determined and a family of volt-ampere characteristics was plotted, each of which was taken at the constant composition and flow rate of working gas, length of open region of the arc and constant design dimensions of the plasmatron. Analysis of the experimental results shows that the volt-ampere characteristics of the MP-04 plasmatron are ascending and linear. It was established that at operating values of current and flow rate of plasma-forming gas, the voltage is in the range of 22...32 V. The coefficient of thermal efficiency of the plasmatron, the bulk mean initial enthalpy and the temperature of plasma jet were determined depending on the arc current by flow calorimetry of the heat flux. It was found that under the conditions of microplasma powder spraying process, the coefficient of thermal efficiency of the plasmatron is in the range of 30...55 % and at gas flow rates, exceeding 40 l/h practically does not change with the current. 16 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: microplasma spraying, argon plasma jet, volt-ampere characteristics of plasmatron, temperature and enthalpy of plasma jet, coefficient of thermal efficiency, voltage and current of plasma arc, plasma-forming gas flow rate

Поступила в редакцію 23.07.2019

ПРОЦЕССЫ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С МОДУЛЯЦИЕЙ СВАРОЧНОГО ТОКА (Обзор) Часть I. Особенности горения нестационарных дуг с тугоплавким катодом

У. Бои¹, И.В. Кривцун²

¹Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона).
510650, г. Гуанчжоу, Тяньхе, ул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

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

Выполнен обзор работ, посвященных процессам сварки неплавящимся электродом в инертном газе с модуляцией сварочного тока. В первой части обзора основное внимание уделено работам, касающимся особенностей протекания тепловых, газодинамических и электромагнитных процессов в нестационарных дугах с тугоплавким катодом при различных режимах модуляции тока дуги. Библиогр. 35, табл. 2, рис. 18.

Ключевые слова: дуга с тугоплавким катодом, дуговая плазма, TIG сварка, модуляция сварочного тока, импульс, частота, коэффициент заполнения, амплитуда

Дуговая сварка неплавящимся электродом в инертном газе (TIG) на сегодняшний день является одним из основных технологических процессов получения высококачественных неразъемных соединений конструкций ответственного назначения из сталей, титановых и алюминиевых сплавов [1]. Вместе с тем данный способ сварки не удовлетворяет все возрастающим требованиям современного промышленного производства вследствие малой проплавляющей способности сварочной дуги с тугоплавким катодом и низкой производительности процесса (скорости сварки). Поэтому усилия ученых и специалистов в последние десятилетия направлены на повышение эффективности TIG сварки при сохранении высокого качества швов.

Модуляция сварочного тока при TIG сварке является одним из широко используемых способов управления тепловыми, газодинамическими и электромагнитными характеристиками дуги, а также характеристиками ее теплового и динамического (силового) воздействия на свариваемый металл. Варьируя параметры модуляции тока, такие как частота, скважность, амплитуда и форма импульсов, можно в достаточно широких пределах управлять глубиной и формой проплавления металла, термическим циклом сварки, а, следовательно, влиять на структуру и свойства металла шва и зоны термического влияния.

Исследованию процессов TIG сварки с модуляцией тока дуги посвящено большое количество работ [2–32]. Экспериментально исследованы режимы с низкочастотной (частота модуляции $f \leq 50$ Гц) [3, 5, 6, 8, 9, 11, 15, 25, 30], среднечастотной ($f \sim 5$ кГц) [2, 4–9, 15, 17] и высокочастот-

ной ($f > 10$ кГц) [2, 5, 6, 10, 13–15, 17, 20–24, 27–29] импульсной модуляцией тока. Теоретическому исследованию и математическому моделированию TIG сварки модулированным током посвящены работы [7, 11, 12, 16, 18, 19, 24, 26–29, 31, 32]. Рассмотрим результаты исследований, описанных в указанных работах, более подробно, при этом в первой части данного обзора основное внимание сосредоточим на работах, посвященных экспериментальным исследованиям физических процессов в нестационарных дугах с тугоплавким катодом при различных режимах модуляции тока дуги.

При TIG сварке с модуляцией сварочного тока процессы переноса энергии, импульса, массы и заряда в плазме столба дуги являются нестационарными, что обусловлено изменением энергетических, газодинамических и электромагнитных характеристик дуговой плазмы под воздействием периодически изменяющегося тока. В результате распределенные и интегральные характеристики плазмы нестационарной сварочной дуги, а также характеристики ее воздействия на свариваемый металл могут значительно отличаться от соответствующих характеристик для дуги постоянного тока (при прочих равных условиях), причем степень этого отличия зависит от частоты следования и формы импульсов, коэффициента заполнения, амплитуды модуляции и других факторов.

По экспериментальным данным работ [21–23] китайских ученых эффективное значение напряжения на дуге длиной 3 мм с тугоплавким катодом (W + 2 % Ce) диаметром 2,4 мм при сварке нержавеющей стали 0Cr18Ni9Ti толщиной 6 мм в аргоне (скорость сварки 120 мм/мин) возрастает

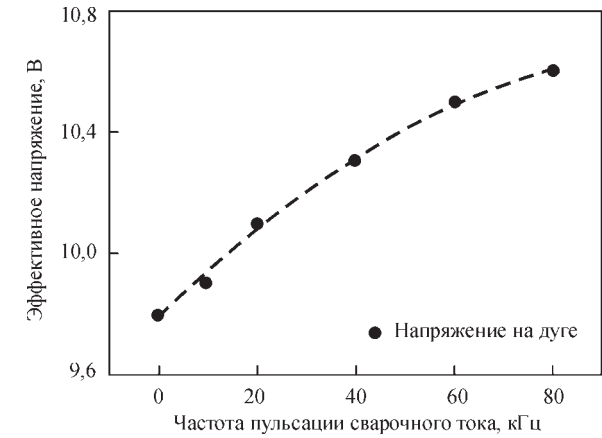


Рис. 1. Зависимость эффективного значения напряжения на дуге от частоты модуляции сварочного тока [22]

Таблица 1. Параметры исследованных режимов ВЧИ модуляции тока дуги [21, 22]

Номер режима	δ , %	f , кГц	$I_{\text{эф}}$, А	I_b , А	I_p , А
1	20	10...80	89,4	60	160
2	50	10...80	98,5	50	130
3	80	10...80	96,0	45	105

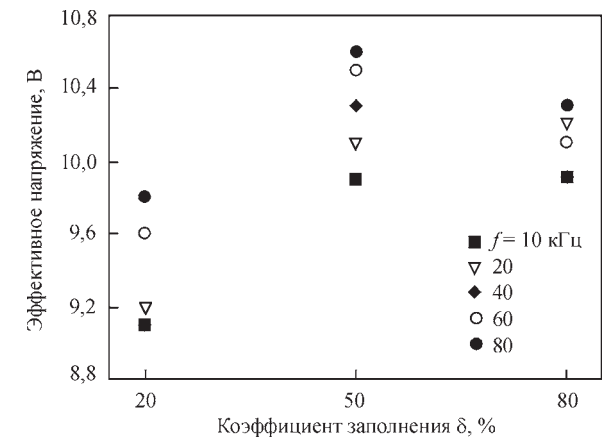


Рис. 2. Эффективные значения напряжения на дуге при различных частотах модуляции тока в зависимости от коэффициента заполнения [21, 22]

практически пропорционально частоте модуляции тока, как показано на рис. 1. В этих экспериментах были использованы следующие параметры импульсной модуляции тока: прямоугольные импульсы в форме меандра, частота следования f варьировалась в диапазоне 10...80 кГц, ток под-

ставки $I_b = 50$ А, ток в импульсе $I_p = 130$ А, эффективное значение тока

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{(1-\delta)I_b^2 + \delta I_p^2} = 98,5 \text{ А},$$

где δ — коэффициент заполнения, определяемый как отношение длительности импульса к периоду модуляции (в рассматриваемом случае $\delta = 0,5$). Соответствующий эксперимент по сварке на постоянном токе был проведен при $I = 100$ А, что практически совпадает с эффективным значением модулированного тока.

В работах [21, 22] исследовано влияние коэффициента заполнения δ на эффективное значение напряжения на дуге при ТИГ сварке нержавеющей стали с высокочастотной импульсной (ВЧИ) модуляцией тока. Изучались три режима импульсной модуляции, параметры которых сведены в табл. 1.

Результаты измерения соответствующих значений напряжения на дуге показаны на рис. 2. Как следует из экспериментальных данных, приведенных на этом рисунке, с ростом δ эффективное значение напряжения на дуге вначале возрастает, а затем остается практически постоянным в диапазоне частот 10...20 кГц и несколько снижается при $f > 40$ кГц. Это приводит к ослаблению влияния частоты на эффективное значение напряжения при высоких значениях коэффициента заполнения.

Путем сравнения изображений дуговой плазмы при различных значениях частоты модуляции тока, в работах [21–23] отмечено заметное уменьшение поперечных размеров столба дуги с тупоплавким катодом при увеличении частоты модуляции, иллюстрируемое рис. 3.

Полученные данные позволили авторам произвести количественную оценку силы, действующей на поверхность свариваемого металла, значения которой приведены в табл. 2 и свидетельствуют о возрастании указанной силы с ростом частоты модуляции f и коэффициента заполнения δ .

В работе [8] экспериментально исследована нестационарная аргоновая дуга длиной 3 мм с тупоплавким катодом (W + 2 % Th) диаметром 2 мм, горящая в диапазоне частот модуляции тока от

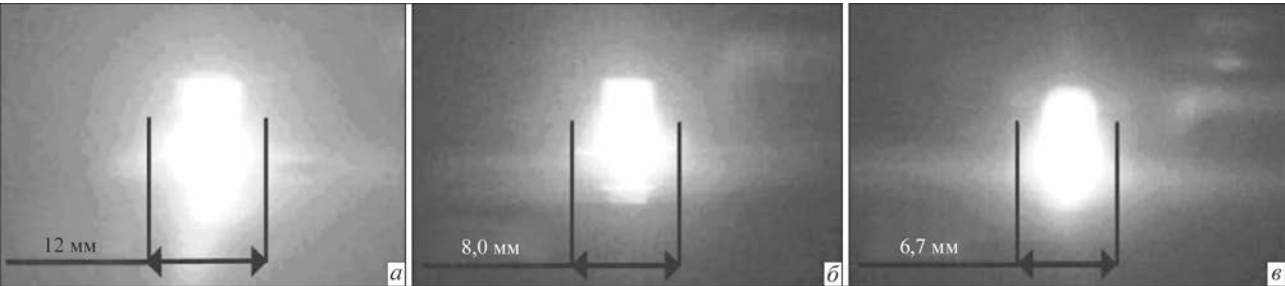


Рис. 3. Фотографии столба дуги постоянного тока (а) и при ВЧИ модуляции тока с частотой 20 (б) и 80 (в) кГц ($\delta = 20\%$) [22, 23]

Таблиця 2. Сила, действующая на поверхность свариваемого металла (мН) при различных параметрах режима импульсной модуляции тока дуги [22]

f , кГц	δ , %		
	20	50	80
0 (постоянный ток)	3,1	3,1	3,1
10	5,9	9,6	4,9
20	6,5	9,2	5,0
40	9,1	11,8	4,4
60	11,6	16,0	5,3
80	17,6	17,1	4,4

0,05 Гц (практически постоянный ток) до 5 кГц. В качестве анода была использована медная водоохлаждаемая пластина либо образец из нержавеющей стали SUS 304 толщиной 3 мм (в последнем случае дуга перемещалась относительно образца с постоянной скоростью, равной 1,6 мм/с). Импульсная модуляция тока проводилась в диапазоне от базового значения тока $I_b = 10$ А до максимального значения $I_p = 150$ А, при этом использовались две формы импульсов: прямоугольная (меандр) и треугольная (без пауз).

В ходе экспериментов установлено, что динамические характеристики рассматриваемой дуги зависят от частоты и формы импульсов тока, а также материала анода. В частности, при низких частотах ($f < 1$ Гц), изменение напряжения на дуге происходит практически вдоль статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) дуги. Для частот 1...10 Гц, даже при условии, что соответствующие значения напряжения на дуге постоянного тока для базового и максимального значений тока различаются, напряжение горения дуги практически постоянно с типичными подъемами и спадами мгновенных значений в моменты роста и снижения тока, соответственно. Этот эффект наблюдается, если скорость изменения тока на фронтах импульсов превышает величину $1,5 \cdot 10^5$ А/с и объясняется авторами [8] запаздыванием изменения концентрации заряженных частиц и, соответственно, электропроводности дуговой плазмы при резком увеличении и снижении тока. В области частот модуляции 100 Гц...1 кГц происходит уменьшение среднего значения напряжения на дуге при базовом значении тока и некоторое его повышение при пиковом значении тока. Наконец при частотах выше 2,5 кГц дуга ведет себя как элемент цепи с постоянным омическим сопротивлением.

Зависимости напряжения V на дуге с медным (водоохлаждаемым) и стальным (плавящимся) анодом при базовом $V_b = V(I_b)$ и пиковом $V_p = V(I_p)$ значениях тока от частоты модуляции показаны на рис. 4. Как следует из представленных на этом рисунке экспериментальных данных, среднее значение напряжения на дуге при базовом

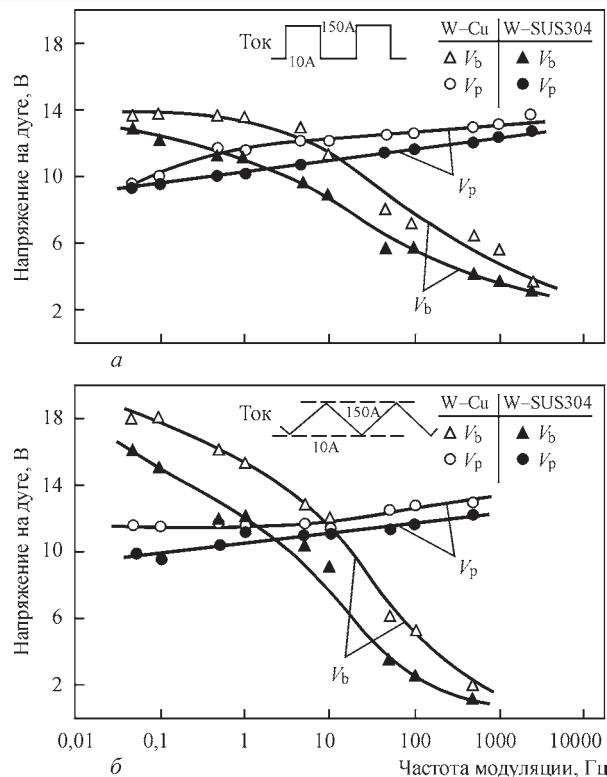


Рис. 4. Напряжение на дуге V_b (при базовом) и V_p (при пиковом значении тока) в зависимости от частоты его импульсной модуляции: а — прямоугольные импульсы (средние значения V_b и V_p); б — треугольные импульсы (максимальные значения V_b и V_p) [8]

значении тока заметно снижается, тогда как соответствующее значение напряжения в импульсе тока несколько увеличивается с ростом частоты. Это позволило авторам [8] сделать вывод о том, что средняя мощность дуги имеет максимальное значение при малых значениях f (фактически для дуги постоянного тока) и снижается с ростом частоты модуляции. Так, например, средняя мощность дуги при частоте 2,5 кГц по оценкам авторов составляет всего 70 % соответствующего значения при $f = 0,5$ Гц.

Исследованию динамических характеристик свободногорящей и сжатой (плазменной) дуги с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом, горящей в аргоне при постоянном токе в диапазоне 20...250 А, посвящена также работа [5]. В данной работе по экспериментальным частотным характеристикам проверялась применимость дифференциального уравнения динамики дуги, которое было получено на основе канальной модели:

$$\theta \frac{dU}{dt} + U = \theta R_s \frac{di}{dt} + R_d i, \quad (1)$$

где $R_s = U_0/I_0$ и $R_d = dU/dI$ — статическое и динамическое сопротивление дуги, соответственно; θ — постоянная времени дуги, определяющая из-

менение проводимости столба дуги G при скачкообразном изменении тока $1/\theta = -d\ln G/dt$.

Модуляция тока в экспериментах осуществлялась путем наложения на постоянный ток переменной (синусоидальной) составляющей с амплитудой 4 А и частотой в диапазоне от 20 Гц до 160 кГц. Было установлено, что для сжатой дуги (диаметр вольфрамового электрода, диаметр плазмформирующего сопла и заглубление электрода в сопло составляли 4 мм, расстояние между электродами — 11 мм, расход плазмообразующего газа варьировался в диапазоне 0,055...0,17 г/с) с ростом тока и расхода плазмообразующего газа постоянная времени дуги уменьшается от 50 до 15 мкс, что качественно и количественно совпадает с результатами расчетов для токов выше 50 А. Что касается свободногорящей аргоновой дуги (диаметр катода 4 мм, длина дуги 2...6 мм), то экспериментально определенные частотные характеристики дуги отличаются от расчетных как в области низких, так и в области высоких частот. В частности, расчет постоянной времени для дуги длиной 2 мм дает значения 2...14 мкс, причем в отличие от сжатой дуги большие значения θ соответствуют большим значениям тока. Анализ полученных данных привел авторов [5] к выводу, что каналовая модель дуги, использованная при выводе уравнения (1), является слишком упрощенной для описания свободногорящей дуги в аргоне и при анализе ее динамики необходимо учитывать перенос тепла за счет конвекции, а также потери энергии на излучение.

В работе [9] описаны результаты экспериментальных исследований оптических и электрических характеристик дуги с тугоплавким катодом, горящей как на постоянном токе, так и при его модуляции. В экспериментах использовалась электрическая дуга с вольфрамовым (W + 2 % Th) катодом диаметром 2,38 мм и углом заточки рабочего конца 30°, защитный газ (Ar) подавался через сопло диаметром 9,5 мм. Питание дуги осуществлялось от источника, который обеспечивал постоянный ток в диапазоне 0...300 А и к которому был подключен транзисторный регулятор для модуляции тока с частотой до 3000 Гц при различной форме импульсов. В качестве анода использовался медный водоохлаждаемый анод (сплошной и разрезной с шириной зазора 0,075 мм) либо анод из нержавеющей стали 304 диаметром 22,22 мм и толщиной 7,62 мм, впаянный в медную водоохлаждаемую обойму. Для измерения интенсивности излучения дуги использовалась фотодиодная матрица, содержащая 256 элементов и работающая в широком диапазоне длин волн (400...1200 нм). Излучение дуги с помощью лин-

зы и диафрагмы фокусировалось на поверхности матрицы, проходя светофильтр, предотвращающий насыщение фотодиодов излучением высокой интенсивности. Оптическая система была настроена на измерение распределения интенсивности излучения в плоскости, расположенной на расстоянии 0,01 мм от поверхности анода.

Эксперименты по измерению интенсивности излучения дуги постоянного тока (в диапазоне 50...300 А), имеющей длину от 2,0 мм до 6,3 мм, показали, что в непосредственной близости от поверхности анода данные распределения с достаточной точностью могут быть аппроксимированы соответствующей гауссовой кривой

$$\varphi(x) = \varphi_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где x — расстояние от плоскости, проходящей через ось симметрии дуги ($x = 0$), а параметр распределения σ определяется как расстояние, на котором значение функции составляет 60 % соответствующего значения φ_0 в указанной плоскости. Обработка экспериментальных данных для дуги длиной 4 мм дала значения σ , возрастающие с ростом тока дуги от 1,0 мм при $I = 50$ А до 2,4 мм при $I = 300$ А и в пределах погрешности измерений не зависящие от типа используемого анода (медный водоохлаждаемый или стальной).

В случае синусоидальной модуляции тока дуги в диапазоне 30...270 А (среднее значение тока $\langle I \rangle = 150$ А) измеренное распределение интенсивности излучения дуги существенно зависит от частоты модуляции, как показано на рис. 5. Так, при малых значениях f соответствующее распределение периодически изменяется с частотой, равной выбранной частоте модуляции между распределением интенсивности излучения дуги постоянного тока $I = I_{\min} = 30$ А и распределением для дуги при $I = I_{\max} = 270$ А. Такое поведение сохраняется вплоть до частоты порядка 500 Гц. С увеличением частоты модуляции амплитуда указанных изменений уменьшается и при $f > 1000$ Гц распределение

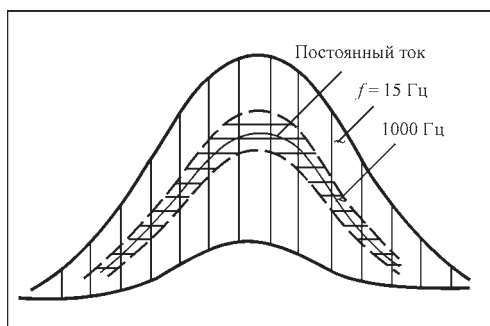


Рис. 5. Характерные формы сигнала с фотодиодной матрицы, характеризующие распределение интенсивности излучения дуги [9]

интенсивности излучения дуги модулированного тока ведет себя подобно распределению для дуги постоянного тока $I = \langle I \rangle = 150$ А.

В работе [9] проведено также экспериментальное определение плотности электрического тока на поверхности анода. Использовалась методика разрезного анода, подробно описанная в [33], и предполагалось, что плотность тока на аноде имеет гауссово распределение по радиусу, подобное (2). Установлено, что определенные таким образом значения параметра распределения σ для дуги постоянного тока увеличиваются с ростом тока и длины дуги. Сравнение полученных значений параметра радиального распределения плотности тока на аноде с соответствующими значениями σ для линейного распределения интенсивности излучения показало, что для дуг длиной от 2,0 до 6,3 мм в диапазоне токов 50...300 А указанные величины практически совпадают. Это позволило авторам сделать вывод о том, что при изменении тока (в том числе за счет модуляции) и длины дуги поперечный размер токового канала на поверхности анода с достаточно высокой степенью точности следует за соответствующим изменением поперечного размера распределения интенсивности ее излучения. Таким образом, вместо экспериментального определения (методом разрезного анода) распределения плотности электрического тока на аноде, можно использовать более простой и быстрый способ измерения интенсивности излучения дуги.

Здесь следует отметить, что предположение о гауссовом распределении плотности тока дуги на аноде, использованное авторами [9], является недостаточно обоснованным. Теоретически наиболее обоснованным является подход, базирующийся на решении интегрального уравнения Абеля, при этом задача восстановления распределения плотности тока в анодной области дуги является математически некорректной и требует разработки устойчивых алгоритмов обработки экспериментальных данных, получаемых с использованием разрезного анода. В работе [34] предложена новая методика восстановления плотности электрического тока на аноде, основанная на использовании устойчивого метода численного расчета второй производной от экспериментально измеренной дискретной функции распределения тока дуги по секциям разрезного анода.

Работа [10] посвящена экспериментальному исследованию распределений средних значений плотности тока и давления дуги на поверхности анода при высокочастотной импульсной модуляции тока. При проведении всех экспериментов использовалась электрическая дуга с вольфрамо-

вым (активированным церием) катодом диаметром 3 мм, имеющим угол заточки рабочего конца 60° . В качестве защитного газа применялся аргон, подаваемый через сопло диаметром 10 мм с расходом 12 л/мин. Анодом дуги служил медный водоохлаждаемый анод с отверстием диаметром 1,0 мм для измерения давления дуги и плотности тока (в последнем случае в указанное отверстие вставлялся изолированный вольфрамовый зонд диаметром 0,9 мм). Длина дуги L варьировалась в диапазоне 2...8 мм, модуляция тока дуги осуществлялась прямоугольными импульсами (меандр) без подставки с частотой следования f до 20 кГц, средний ток $\langle I \rangle$ задавался в диапазоне 30...130 А.

Результаты экспериментального измерения радиальных распределений средних по времени значений плотности электрического тока и давления дуги на поверхности анода приведены на рис. 6, 7. Как следует из представленных на этих рисунках кривых среднее значение плотности тока в центре области анодной привязки дуги растет с увеличением частоты модуляции (см. рис. 6, а), а также величины среднего тока (см. рис. 6, б) и, наоборот, убывает при увеличении длины дуги (см. рис. 6, в).

Что касается распределений среднего значения давления дуги, то его значение в центре области анодной привязки, по данным [10], изменяется с ростом частоты модуляции тока немонотонно. В диапазоне частот от 0 до 5 кГц указанная величина растет, тогда как при дальнейшем увеличении частоты до 20 кГц, максимальное значение давления дуги на поверхность анода заметно снижается (см. рис. 7, а). Экспериментально измеренное давление в центре области анодной привязки дуги при частоте модуляции $f = 10$ кГц растет с увеличением среднего тока (см. рис. 7, б) и снижается при увеличении длины дуги (см. рис. 7, в).

В целом, полученные в работе [10] экспериментальные данные позволили авторам сделать вывод о контракции (уменьшении поперечного размера) анодной области дуги с тугоплавким катодом при импульсной модуляции тока, при этом степень такой контракции возрастает с увеличением частоты от 0 до 5 кГц и снижается в диапазоне 5...20 кГц. Последнее обстоятельство позволяет рекомендовать ТИГ процесс с ВЧИ модуляцией тока дуги для сварки тонких металлов, используя при этом частоту модуляции порядка 20 кГц.

Завершая рассмотрение работы [10], следует отметить, что данные, приведенные в сообщении [13], опровергают закономерность, обнаруженную авторами [10] и заключающуюся в увеличении давления дуги на поверхность анода с ростом частоты модуляции тока в диапазоне 0...5 кГц и его уменьшении при дальнейшем росте частоты. В

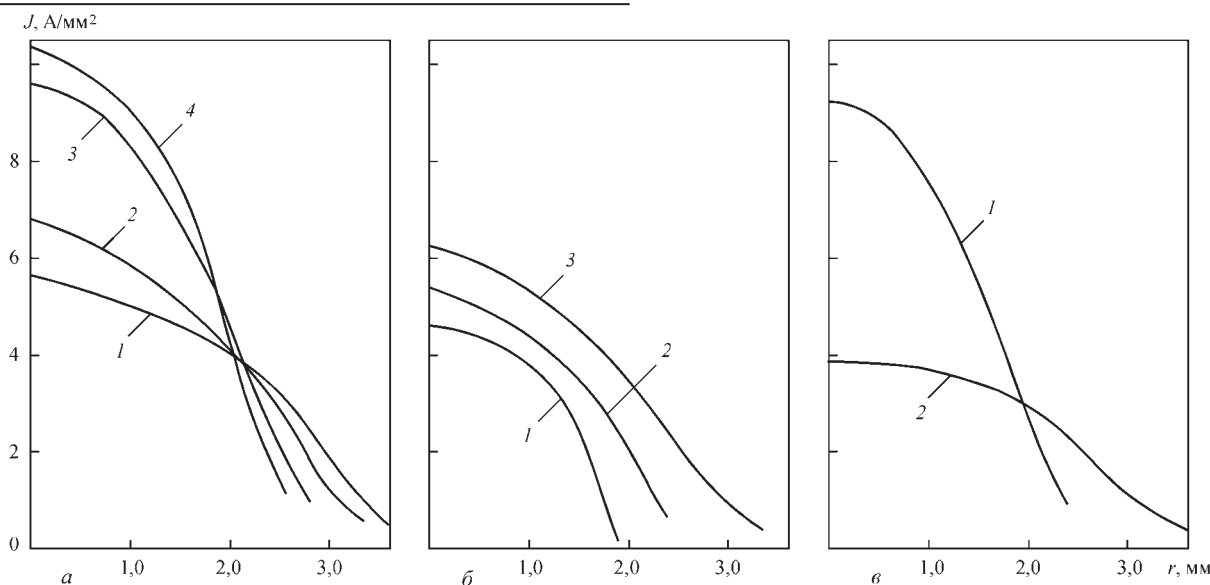


Рис. 6. Радиальные распределения средних за период модуляции значений плотности электрического тока на поверхности анода: а — $\langle I \rangle = 100$ А, $L = 4$ мм (I — постоянный ток; 2 — $f = 5$; 3 — 10; 4 — 20 кГц); б — $f = 5$ кГц, $L = 2$ мм (I — $\langle I \rangle = 30$; 2 — 50; 3 — 100 А); в — $\langle I \rangle = 100$ А, $f = 10$ кГц (I — $L = 4$; 2 — 8 мм) [10]

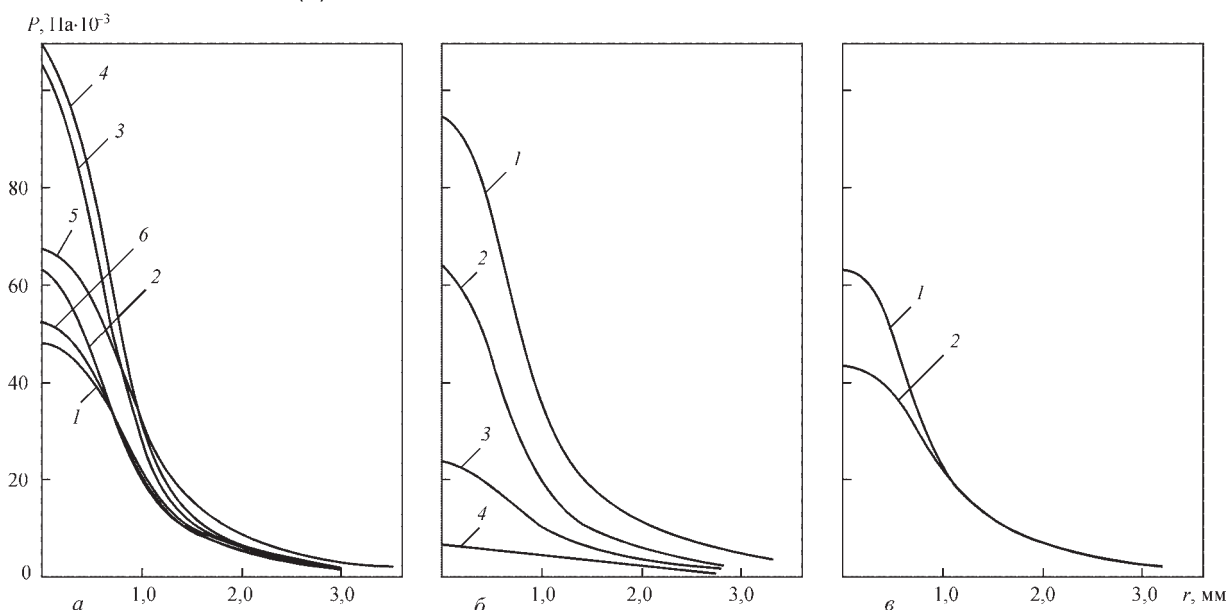


Рис. 7. Радиальные распределения средних за период модуляции значений давления дуги на поверхности анода: а — $\langle I \rangle = 100$ А, $L = 4$ мм (I — постоянный ток; 2 — $f = 300$ Гц; 3 — 3; 4 — 5; 5 — 10; 6 — 20 кГц); б — $f = 10$ кГц, $L = 4$ мм (I — $\langle I \rangle = 130$; 2 — 100; 3 — 70; 4 — 40 А); в — $\langle I \rangle = 100$ А, $f = 10$ кГц (I — $L = 2$; 2 — 6 мм) [10]

частности, представленная на рис. 8 зависимость свидетельствует о непрерывном возрастании указанной величины с ростом частоты модуляции — достаточно быстром в диапазоне от 0 до 5 кГц и более медленном при $f > 5$ кГц.

В работе [14], с помощью разработанного авторами специализированного источника питания дуги, обеспечивающего ВЧИ модуляцию тока с частотой до 20 кГц при высоких пиковых значениях тока (до 500 А), экспериментально исследовано влияние параметров модуляции на степень контракции дуги с тугоплавким катодом, распределение давления дуги на поверхности анода, а также стабильность ее горения. Для определе-

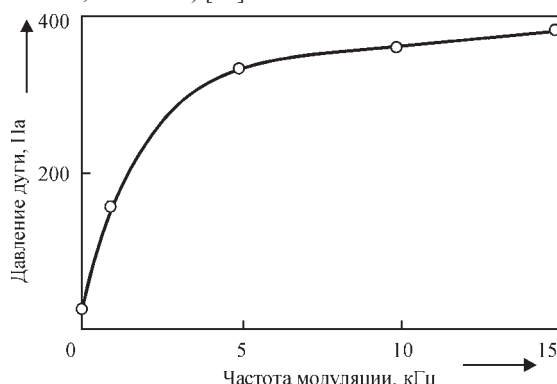


Рис. 8. Давление дуги на поверхность анода как функция частоты модуляции тока: дуга длиной 2 мм с тугоплавким ($W + 2\% Th$) катодом диаметром 2,4 мм; угол заточки 60° ; средний ток 50 А; амплитудное значение тока 150 А; ток в паузе 5 А [13]

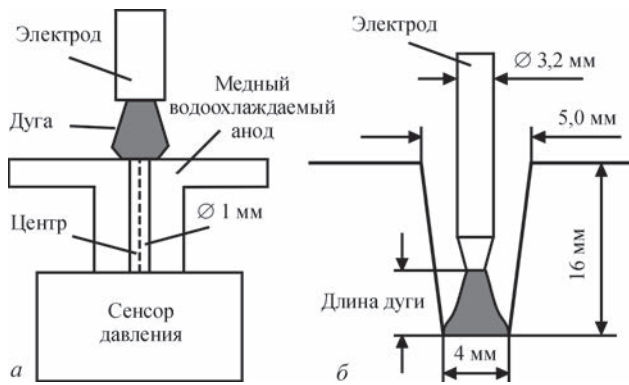


Рис. 9. Схемы экспериментальных стендов для измерения давления дуги с тугоплавким катодом (а) и определения стабильности ее горения (б) [14]

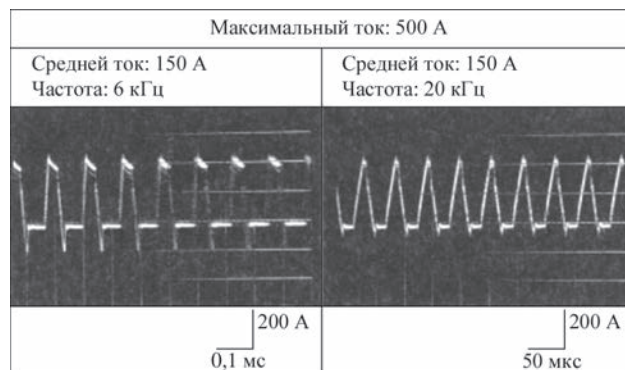


Рис. 10. Характерные формы тока дуги при различных значениях частоты модуляции [14]

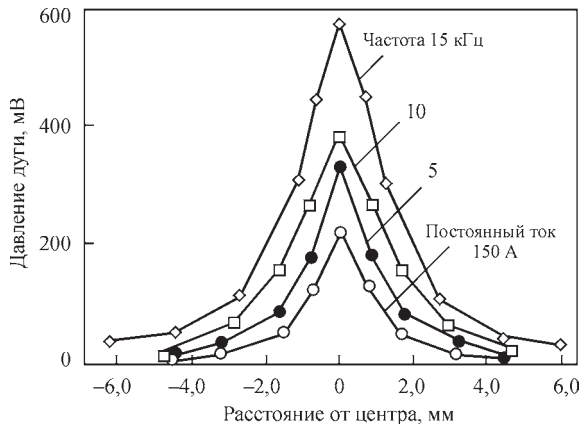


Рис. 11. Распределение давления дуги вдоль поверхности анода (относительные единицы) при различных значениях частоты модуляции тока: максимальный ток — 500 А; средний ток — 150 А; длина дуги — 2 мм [14]

ния указанных характеристик дуги использовались экспериментальные стенды, схематически изображенные на рис. 9. Реализуемая в экспериментах форма тока для двух характерных значений частоты модуляции показана на рис. 10, при этом его значение I_p в импульсе составляло 500 А, а средний ток $\langle I \rangle$ имел постоянное значение, равное 150 А.

Результаты проведенных экспериментов показали, что давление дуги в центре области анодной привязки непрерывно возрастает с увеличени-

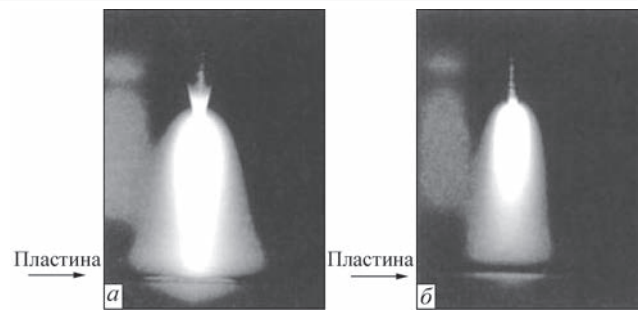


Рис. 12. Внешний вид дуги с ВЧИ модуляцией тока (а) и дуги постоянного тока (б), равного $\langle I \rangle$ для а: частота — 10 кГц; максимальный ток — 500 А; среднее значение тока — 50 А; для б: постоянный ток — 50 А [14]

ем частоты модуляции (при сохранении значений $\langle I \rangle$, I_p), как показано на рис. 11. В частности, для дуги длиной 2 мм при $f = 15$ кГц указанная величина в два раза превосходит соответствующее значение при $f = 5$ кГц и в три раза — значение для дуги постоянного тока, равного $\langle I \rangle$.

Приведенные на рис. 12 фотографии дуги при меньшем среднем токе ($\langle I \rangle = 50$ А) позволили авторам [14] сделать вывод, что степень контракции дуги и стабильность ее горения при ВЧИ модуляции тока ($f = 10$ кГц) выше, чем для соответствующей дуги постоянного тока. По их мнению, это связано с тем, что ярко светящаяся область столба дуги при высокочастотной модуляции тока существенно длиннее по сравнению с соответствующей областью в дуге постоянного тока и занимает весь разрядный промежуток. Экспериментальные исследования поведения дуги в узкой разделке, показанной на рис. 9, б, подтвердили вывод о более высокой пространственной стабильности дуги с ВЧИ модуляцией тока. Так, дуга при частоте модуляции $f = 10$ кГц была стабильной при длине L до 5 мм, тогда как дуга постоянного тока испытывала отклонения даже при $L = 2$ мм.

Экспериментальному исследованию физических характеристик дуговой плазмы при импульсной модуляции тока дуги с тугоплавким катодом посвящена работа [15]. В экспериментах использовалась дуга с тугоплавким катодом (W + 2 % Се) диаметром 3 мм, угол заточки рабочего конца — 60° , длина дуги — 4 мм, защитный газ — Ar. В качестве источника питания дуги был выбран серийный сварочный аппарат EWM Tetrix 500 с подключенным к нему специальным устройством, обеспечивающим модуляцию тока дуги прямоугольными импульсами в диапазоне частот до 80 кГц. Ток в импульсе I_p устанавливался равным 100 А, базовый ток I_b задавался на уровне 50 А.

На рис. 13 приведены фотографии дуги во время импульса тока и при базовом токе для различных значений частоты модуляции f . Как следует из этого рисунка, с ростом f изменяется форма

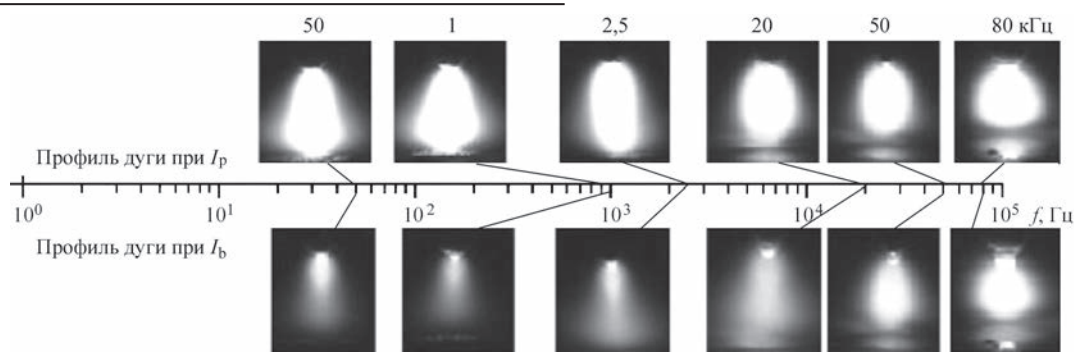


Рис. 13. Внешний вид дуги при $I = I_p$ (вверху) и при $I = I_b$ (внизу) для различных значений частоты модуляции тока [15]

столба дуги — от «грушевидной» с диффузной привязкой к аноду до «шароподобной» с темным пространством вблизи анода, причем для частот выше 50 кГц внешний вид дуги во время импульса тока практически не отличается от ее вида во время паузы.

Представленные на рис. 14 зависимости напряжения на дуге при пиковом значении тока $U_p = U(I_p)$ и при его базовом значении $U_b = U(I_b)$ от частоты импульсной модуляции свидетельствуют о существенном увеличении U_p и снижении U_b с ростом f , что качественно соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [8] (см. рис. 4). Это приводит к тому, что при увеличении частоты импульсной модуляции напряжение на дуге осциллирует со все возрастающей амплитудой.

На рис. 15 приведена зависимость концентрации электронов N_e в плазме столба дуги при пиковых значениях тока от частоты его модуляции. Для нахождения N_e авторами [15] использовались экспериментальные данные по уширению спектральных линий излучения дуговой плазмы за счет эффекта Штарка [35]. Согласно полученных данных концентрация электронов в столбе дуги с ростом частоты модуляции тока вначале растет (вплоть до частот порядка 20 кГц), а затем резко падает. Возможной причиной такого поведения

N_e является то, что измерения концентрации электронов проводились вблизи анода, где свечение плазмы при частотах выше 20 кГц заметно ослаблено за счет изменения формы столба дуги (см. рис. 13).

В работе [17] экспериментально исследовано влияние частоты модуляции тока на характеристики дуги при ТИГ сварке алюминиевого сплава 5А06 толщиной 3 мм в режиме разнополярных импульсов тока. В экспериментах использовалась дуга длиной 3 мм с вольфрамовым катодом диаметром 2,4 мм. Ток дуги модулировался прямоугольными импульсами (скорость изменения тока на фронтах импульсов составляла 50...100 А/мкс) с амплитудой тока прямой полярности $I_p = 80$ А и обратной — $I_N = 120$ А при соотношении длительностей импульсов прямой t_p и обратной t_N полярностей 8/2. Частота модуляции f варьировалась в диапазоне 0,1...20 кГц. Осциллограмма сварочного тока от времени при $f = 20$ кГц приведена на рис. 16.

Соответствующие осциллограммы тока и напряжения на дуге при $f = 5$ кГц показаны на рис. 17.

На рис. 18 приведены измеренные значения напряжения на дуге (во время прямой и обратной полярностей тока) в зависимости от частоты модуляции. При проведении этих экспериментов использовался следующий режим модуляции

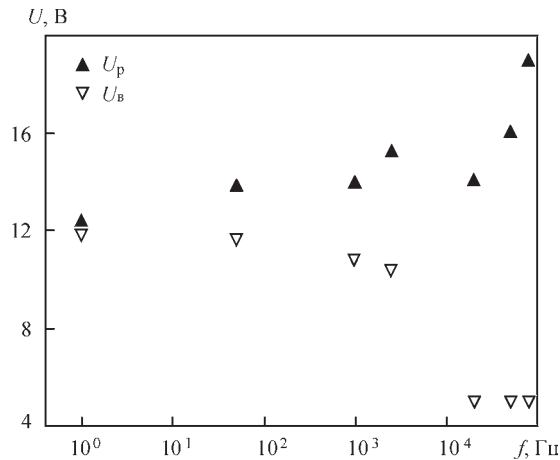


Рис. 14. Зависимости напряжения на дуге в импульсе (U_p) и в паузе (U_b) от частоты модуляции тока [15]

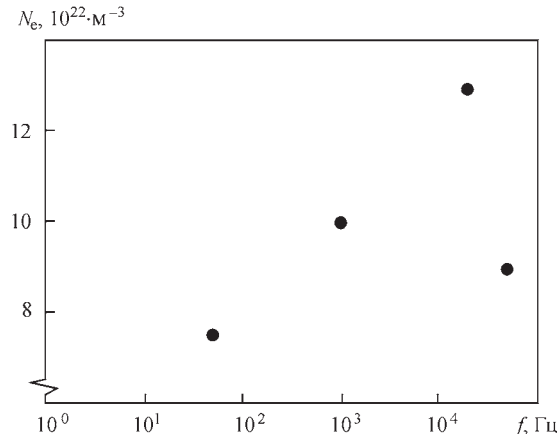


Рис. 15. Зависимость концентрации электронов в столбе дуги при пиковых значениях тока от частоты его модуляции [15]

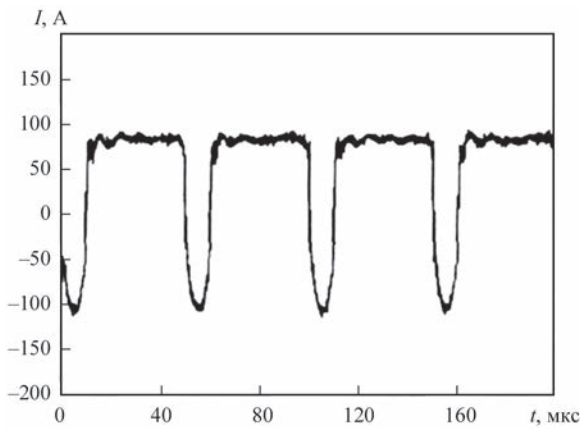


Рис. 16. Зависимость тока дуги от времени при TIG сварке алюминиевого сплава в режиме разнополярных импульсов [17]

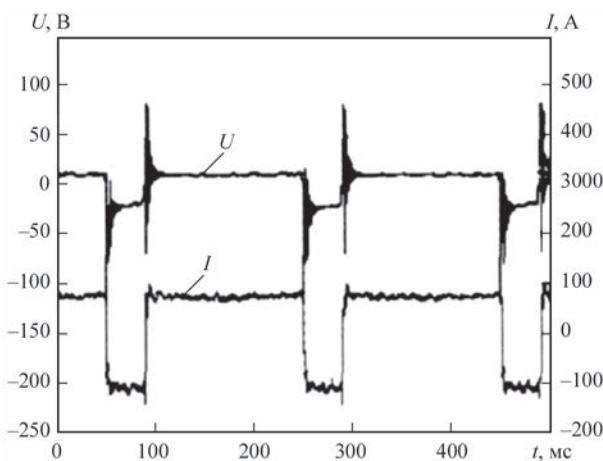


Рис. 17. Осциллограммы напряжения (верхняя кривая) и тока дуги (нижняя кривая) при TIG сварке в режиме разнополярных импульсов [17]

тока: $I_p = 100$ А; $I_N = 120$ А; $t_p/t_N = 8/2$. Как следует из рис. 18 напряжение на дуге достаточно быстро растет с частотой модуляции в диапазоне $f < 1$ кГц, а при дальнейшем увеличении частоты скорость его роста заметно снижается, причем во всем исследованном диапазоне частот напряжение на дуге прямой полярности существенно ниже аб-

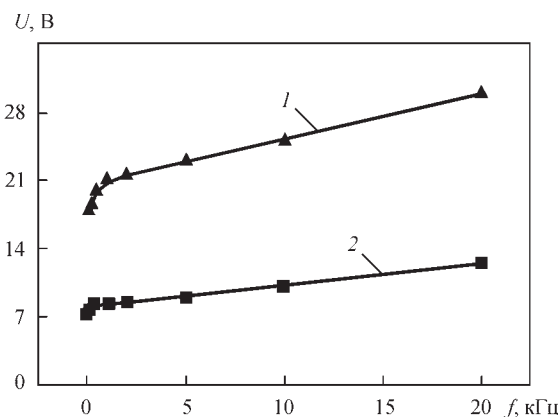


Рис. 18. Зависимость от частоты модуляции тока абсолютных значений напряжения на дуге обратной (1) и прямой (2) полярностей при TIG сварке в режиме разнополярных импульсов [17]

солютной величины соответствующего значения для дуги обратной полярности.

Анализ результатов экспериментальных работ, касающихся изучения особенностей физических явлений, протекающих в нестационарных электрических дугах при TIG сварке с импульсной модуляцией сварочного тока, позволяет сделать следующие выводы:

1. Форма светящейся области столба нестационарной дуги при TIG сварке с высокочастотной ($f > 10$ кГц) импульсной модуляцией тока заметно отличается от соответствующей формы для дуги постоянного тока, равного среднему значению модулированного тока. Это отличие заключается в уменьшении поперечных размеров (контракции) прианодной зоны столба дуги и, как следствие, в повышении плотности тока на поверхности анода при увеличении частоты модуляции. В результате форма столба дуги от «грушевидной» с диффузной привязкой к аноду при постоянном токе изменяется до «шарообразной» с темным пространством вблизи анода при ВЧИ модуляции тока, причем для частот выше 50 кГц форма столба дуги во время импульса тока практически не отличается от соответствующей формы во время паузы.

2. Высокочастотная импульсная модуляция тока дуги с тугоплавким катодом приводит к существенному повышению давления потока дуговой плазмы на поверхность анода по сравнению с давлением дуги постоянного тока. При TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока это вызывает дополнительный прогиб поверхности сварочной ванны, результатом которого является заглубление источника тепла в свариваемый металл и, соответственно, повышение проплавляющей способности дуги. Что касается влияния частоты модуляции тока на величину давления дуги, то данная величина испытывает быстрый рост с увеличением частоты в диапазоне средних частот ($f < 5$ кГц), тогда как при дальнейшем росте частоты модуляции по данным разных авторов давление дуги ведет себя по-разному: несколько снижается [10], стабилизируется [13] или продолжает возрастать [14].

3. Что касается зависимости напряжения на дуге от частоты модуляции тока при TIG сварке, то у авторов рассмотренных работ также нет единого мнения. Так, например, по данным [21–23] эффективное значение напряжения возрастает практически пропорционально частоте модуляции. Экспериментальные данные работы [8] свидетельствуют о том, что среднее значение напряжения на дуге во время паузы тока заметно снижается, тогда как среднее значение напряжения во время импульса слабо увеличивается с

ростом частоты. В результате, как среднее, так и эффективное значения напряжения на дуге снижаются с ростом частоты модуляции тока. Наконец, в работе [15] показано, что напряжение на дуге во время паузы тока снижается при увеличении частоты модуляции практически с той же скоростью, что и растёт напряжение во время импульса.

Список литературы/References

1. Lienert T.J., Babu S.S., Siewert T.A., Acoff V.A. (eds.) (2011) ASM Handbook. Vol. 6A. *Welding fundamentals and processes*. Ohio, USA, ASM International.
2. Roden W.A. (1972) High-frequency, pulsed-current GTA welding. *National Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting Proc.*, 2–5 Oct. 1972. San Diego, California, USA. Paper 720874, pp. 1–8.
3. Leitner R.E., McElhinney G.H., Pruitt E.L. (1973) An investigation of pulsed GTA welding variables. *Welding J., Res. Suppl.*, **9**, 405–410.
4. Yamaoto T., Shimada W., Gotoh T. (1976) Characteristics of high frequency pulsed DC TIG welding process. *IW 212-628-76*, 16–22.
5. Соколов О.И., Гладков Э.А. (1977) Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом. *Сварочное производство*, **4**, 3–5.
6. Sokolov, O.I., Gladkov, E.A. (1977) Dynamic characteristics of free-burning and constricted welding arc of direct current with nonconsumable electrode. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 3–5 [in Russian].
7. Omar A.A., Lundin C.D. (1979) Pulsed plasma – pulsed GTA arcs: A study of the process variables. *Welding J., Res. Suppl.*, **4**, 97–105.
8. Cook G.E., Eassa H.E.-D.E.H. (1985) The effect of high-frequency pulsing of a welding arc. *IEEE Transactions on Industrial Application*, **1A-21**, **5**, 1294–1299.
9. Kolasa A., Matsunawa A., Arata Y. (1986) Dynamic characteristics of variable frequency pulsed TIG arc. *Transaction of JWRI*, **15**, **2**, 173–177.
10. Saedi H.R., Unkel W. (1988) Arc and weld pool behavior for pulsed current GTAW. *Welding J., Res. Suppl.*, **11**, 247–255.
11. Zhao J., Sun D., Hu S. (1992) Arc behavior of high frequency pulse TIG welding arc. *Trans. China Weld Inst.*, **13**(1), 59–66.
12. Kim W.H., Na S.J. (1998) Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **41**, **21**, 3213–3227.
13. Wu C.S., Zheng W., Wu L. (1999) Modelling the transient behaviour of pulsed current tungsten-inert-gas weldpools. *Modelling and Simul. Mater. Sci. Eng.*, **7**, **1**, 15–23.
14. Dzelnitzki D. (2000) Muendersbach TIG – direct-current welding with high-frequency pulses, an interesting process variant. *EWM Hightec Welding GmbH*. WM008801. DOC; 08.00.
15. Onuki J., Anazawa Y., Nihei M. et al. (2002) Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation. *Japan. J. Appl. Phys.*, **41**, 5821–5826.
16. Song Y., Yan S., Xiao T. et al. (2010) A Study on the macro-micro physical properties in pulsed arc plasma. *Transactions of JWRI*, **39**, **2**, 17–18.
17. Wu C.S. (2008) *Welding heat process and pool geometry*. Beijing, China Machine Press, cc. 102–104.
18. Cong B., Qi B., Zhou X. (2009) TIG arc behavior of ultrafast-convert high-frequency variable polarity square wave. *Trans. China Welding Institution*, **30**, **6**, 87–90.
19. Traidia A., Roger F. (2011) Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding. *Int. J. of Heat and Mass Transfer.*, **54**, 2163–2179.
20. Karunakaran N., Balasubramanian V. (2011) Effect of pulsed current on temperature distribution weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 278–286.
21. Yang M., Qi B., Cong B. et al. (2012) The influence of pulse current parameters on arc behavior by austenite stainless steel. *Trans. China Welding Institution*, **33**, **10**, 67–71.
22. Qi B., Yang M., Cong B. et al. (2012) Study on fast-convert ultrasonic frequency pulse TIG welding arc characteristic. *Mater Sci. Forum.*, 704–705, 745–751.
23. Qi B., Yang M., Cong B. et al. (2013) The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **66**, 1545–1553.
24. Yang M., Qi B., Cong B. et al. (2013) Study on electromagnetic force in arc plasma with UHFP-GTAW of Ti–6Al–4V. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, **9**, 2561–2568.
25. Yang Z., Qi B., Cong B. et al. (2013) Effect of pulse frequency on weld appearance behavior by TC4 titanium alloys. *Trans. China Welding Institute*, **34**, **12**, 37–40.
26. Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф. (2013) Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **7**, 14–25.
27. Krivtsun, I.V., Krikent, E.V., Demchenko, V.F. (2013) Modelling of dynamic characteristics of a pulsed arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **7**, 13–23.
28. Yang M., Yang Z., Cong B. et al. (2014) A study on the surface depression of the molten pool with pulsed welding. *Welding J., Res. Suppl.*, **93**, **8**, 312–319.
29. Yang M., Yang Z., Qi B. (2015) The effect of pulsed frequency on the plasma jet force with ultra high frequency pulsed arc welding. *International Institute of Welding*, **8**, 875–882.
30. Сидорец В.Н., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. и др. (2016) Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических вольт-амперных характеристик аргонной дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **2**, 7–13.
31. Sydorets, V.N., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. et al. (2016) Calculation and experimental research of static and dynamic volt-ampere characteristics of argon arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **2**, 2–8.
32. Cunha T.V.d., Louise-Voigt A., Bohorquez C.E.N. (2016) Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, **231**, 449–455.
33. Silva D.C.C., Scotti A. (2016) Using either Mean or RMS values to represent current in modeling of arc welding bead geometries. *Ibid*, **240**, 382–387.
34. Демченко В.Ф., Бои У., Кривцун И.В. и др. (2017) Действующие значения электродинамических характеристик процесса сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги. *Автоматическая сварка*, **8**, 3–14.
35. Demchenko, V.F., Boi, U., Krivtsun, I.V., Shuba, I.V. (2017) Effective values of electrodynamic characteristics of the process of nonconsumable electrode welding with pulse modulation of arc current. *The Paton Welding J.*, **8**, 2–11.
36. Nestor O.H. (1962) Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *J. Appl. Phys.*, **33**, **5**, 1638–1648.
37. Демченко В.Ф., Бои У., Кривцун И.В. и др. (2016) Методика восстановления распределения плотности электрического тока в анодном пятне дуги с тугоплавким катодом по экспериментальным данным, полученным методом разрезного анода. *Сб. трудов VIII Межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*. 19–23 сентября 2016. Одесса, Украина, cc. 21–28.
38. Demchenko, V.F., Boi, U., Krivtsun, I.V. et al. (2016) Procedure of density distribution restoration of electric current in arc anode spot with refractory cathode according

to experimental data obtained by the method of split anode. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes (19-23 September 2016, Odessa Ukraine)*, 21-28.

35. Грим Г. (1978) *Уширение спектральных линий в плазме*. Москва, Мир.
Grim, G. (1978) *Spectral line broadening in plasma*. Moscow, Mir [in Russian].

ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ (Огляд)

Частина I. Особливості горіння нестационарних дуг з тугоплавким катодом

У. Бої¹, І.В. Кривцун²

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).
510650, м. Гуанчжоу, Тяньхе, вул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано огляд робіт, присвячених процесам зварювання неплавким електродом в інертному газі з модуляцією зварювального струму. У першій частині огляду основна увага приділялась роботам, що стосуються особливостей протікання теплових, газодинамічних та електромагнітних процесів в нестационарних дугах з тугоплавким катодом при різних режимах модуляції струму дуги. Бібліогр. 35, табл. 2, рис. 18.

Ключові слова: дуга з тугоплавким катодом, дугова плазма, TIG зварювання, модуляція зварювального струму, імпульс, частота, коефіцієнт заповнення, амплітуда

PROCESSES OF NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING WITH WELDING CURRENT MODULATION (Review)

Part 1. Peculiarities of burning of non-stationary arcs with refractory cathode

U. Boi¹, I.V. Krivtsun²

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding).
363 Chiansin Str., Tianhe, 510650, Guangzhou. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

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

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Works devoted to the processes of inert-gas nonconsumable electrode welding with current modulation were reviewed. In the first part of the review attention is focused on studies, dealing with the features of running of thermal, gas-dynamic and electromagnetic processes in non-stationary arcs with refractory cathode at different modes of arc current modulation. 35 Ref., 2 Tabl., 18 Fig.

Keywords: arc with refractory cathode, arc plasma, TIG welding, welding current modulation, pulse, frequency, duty cycle, amplitude

Поступила в редакцію 28.10.2019

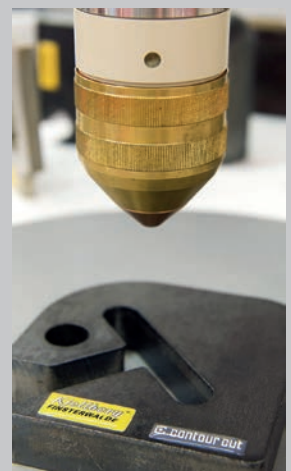
Cutting World 2020

Ярмарка профессиональных технологий резки

С 28 по 30 апреля 2020 г. Cutting World будет открыта в Messe Essen. Это единственная выставка, которая концентрируется на всей технологической цепочке на тему резки. Многочисленные экспоненты уже воспользовались возможностью, чтобы обеспечить зоны стендов в новом зале 8. В их число входят следующие компании: Assfalg, Boschert, Cam Concept, Eckelmann, Kjellberg, MGM, ProCom and Rosenberger, Air Liquide Deutschland, BKE, IHT Automation, NUM, STM Waterjet and Yamazaki Mazak. Заинтересованные участники могут найти регистрационные документы на www.cuttingworld.de. Крайний срок регистрации 30 ноября 2019 г.

В 2020 г. Cutting World впервые пройдет в модернизированном зале 8 в Messe Essen. Экспоненты и посетители попадут в зал через новое, залитое светом стеклянное фойе. Восточный конгресс-центр расположен в непосредственной близости и будет принимать Немецкий конгресс по резке и Немецкую конференцию по газопламенной резке.

Кроме того, участники Cutting World получают выгоду от благоприятного для инвестиций климата, потому что рынок режущих установок находится в состоянии постоянного изменения. Почти половина существующих металлорежущих станков уже более семи лет, и в этом секторе все больше требуются современные процедуры создания сетей и взаимосвязи последующих и начальных процессов обработки. Благодаря технологиям Industry 4.0 эксперты ожидают дополнительный потенциал получения прибыли в диапазоне миллиардов Евро для машиностроения в Германии в ближайшие годы.



МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАПЛАВЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОГО ШАРУ ЗМІННОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

В.П. Іванов, Л.К. Лещинський, С.В. Щербаков

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» МОН України.
87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: ivanov_v_p@pstu.edu

Показано, що характер змінення хімічного складу шва (наплавленого металу) визначається законом управління об'ємної швидкістю подачі легуючого електрода, який отримано шляхом математичного моделювання впливу технології наплавлення на процес легування зварювальної ванни. Встановлено, що високий градієнт зміни хімічного складу по довжині шва забезпечується дискретним змінням об'ємної швидкості подачі легуючого електрода. При прямокутній формі імпульсу подачі електрода розподіл легуючих елементів в металі шва є несиметричний на стадії зростання і зниження концентрації, що проявляється в більшій мірі зі збільшенням об'єму зварювальної ванни. Представлено підтверджені експериментом результати розрахунку, які свідчать, що трапецеїдальна форма імпульсу дозволяє зменшити несиметричність зміни складу. Виявлено, що при імпульсній подачі легуючого електрода за законом синусоїди можна змінювати характер і градієнт розподілу легуючих елементів в шві. Визначено умови формування наплавленого шару змінного складу і твердості по довжині бочки прокатного валка безперервно-заготовочного стану. Бібліогр.12, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: математичне моделювання, зварювальна ванна, наплавлений метал, змінний хімічний склад, легуючий електрод, форма імпульсу подачі, прокатний валок, змінна твердість по довжині бочки

Застосування технології, що дозволяє змінювати склад металу в процесі зварювання (наплавлення) [1, 2], багато в чому визначається можливістю забезпечити задані зміни вмісту легуючих елементів на ділянках переходу, а також стабілізацію складу між цими ділянками [3]. У той же час необхідно враховувати, що відхилення складу металу шва від необхідного може бути викликано змінами параметрів режиму. Це пов'язано з відхиленнями в геометрії виробу, похибками при налаштуванні обладнання, а також можливими коливаннями напружності. Крім того, зміна параметрів режиму може бути пов'язана зі змінною кривизною наплавленої поверхні, яка впливає на умови формування зварювальної ванни [4]. При цьому слід зазначити, що рішення задачі геометричної адаптації вектора швидкості зварювання (наплавлення робочих шарів) складної конфігурації забезпечує система управління процесом, автоматизоване і роботизоване обладнання. Використання програмування методами off-line і on-line, а також контактних і безконтактних датчиків, пристроїв стеження за дугою, дозволяє управляти складними переміщеннями зварювального пальника в просторі. На відміну від цього, процес технологічної адаптації важко автоматизувати. Більш того, відхилення параметрів режиму, навіть в разі їх успішної адаптації, при змінених зовнішніх умовах не можуть не привести до змін складу металу.

Разом з тим, такі зміни можуть здійснюватися цілеспрямовано, щоб забезпечити відповідність

розподілу властивостей металу характеру і інтенсивності навантаження. Для наближеної оцінки характеру зміни концентрації легуючого елемента в металі при лінійному зростанні його вмісту в електроді від X до Y , в роботі [5] отримана розрахункова залежність шляхом обробки експериментальних даних. За результатами обробки, закон зміни концентрації в шві, близький до експоненціального, характеризується лінійною залежністю кута нахилу дотичній до експоненти $(Y - X)/D = \tan \alpha$, де D — характеристична довжина ділянки переходу від X до Y , α — кут, що визначає градієнт швидкості подачі в ванну легуючого електрода. Значно складнішою є задача розробки адекватної математичної моделі, що дозволяє прогнозувати вплив на хімічний склад шва змін умов легування в процесі наплавлення, в тому числі, при високій швидкості цих змін. В роботі [6] для моделювання процесу легування при наплавленні металу змінного складу в якості вхідних параметрів розглядаються об'ємна швидкість подачі легуючих елементів в ванну і розміри (об'єм) зварювальної ванни. Але використання даних моделей для розробки варіантів технології наплавлення робочого шару зі змінним складом та властивостями потребує вивчення впливу об'ємної швидкості подачі легуючих елементів в зварювальну ванну на їх вміст в шві. Метою роботи було проведення досліджень на математичній моделі можливості управління процесом легування швів зі змінним хімічним складом та властивостями.

Умови моделювання передбачають подачу в ванну постійного об'єму двох відмінних за хіміч-

ним складом електродів, зі зміною швидкості подачі кожного з яких сумарна масова швидкість подачі залишається постійною (рис. 1). Зміна концентрації $C(t)$ на ділянці переходу залежить від об'ємної швидкості подачі легуючого елемента, ступеня його засвоєння з електрода та флюсу. Крім того, враховується розбавлення шва основним металом (попереднім шаром), а також буферний вплив об'єму ванни (V), що обмежує можливість високих градієнтів легування. Для квазістаціонарного стану ванни, коли її об'єм можна прийняти постійним, з рівняння матеріального балансу легуючого елемента в роботі [6] отримана залежність для розрахунку змін складу $C(t)$ на ділянці переходу:

$$C(t) = e^{-(v_n/V)t} \times \left\{ \int_0^t \left[v_{ле}(t) C_{ле} \eta_e + v_s k_{ф} C_{ф} \eta_{ф} + C_{ом}(t) v_{ом} \eta_{ом} \right] \times \frac{1}{V} e^{(v_n/V)t} dt + C_0 \right\}, \quad (1)$$

де $C_{ле}$, $C_{ф}$, $C_{ом}(t)$ — об'ємна концентрація легуючого елемента в електроді, флюсі та її розподіл в основному металі (попередньому шарі); η_e , $\eta_{ф}$, $\eta_{ом}$ — коефіцієнти переходу елемента з електрода, флюсу, основного металу; $k_{ф}$ — відносна маса флюсу; $v_n(t) = v_s + v_{ом}(t)$ — об'ємна швидкість наплавлення; $v_{ом}(t)$ — об'ємна швидкість проплавлення основного металу; $\gamma(t)$ — частка участі основного металу в шві; $v_s = v_{ле}(t) + v_e(t) = \text{const}$ — сумарна об'ємна швидкість подачі електродів; $v_{ле}(t)$, $v_e(t)$ — об'ємна швидкість подачі електрода, що містить легуючий елемент, і не містить такого, відповідно; C_0 — постійна інтегрування.

За заданим законом $C(t)$, з урахуванням відомих параметрів процесу наплавлення, для визначення швидкості подачі легуючого електрода $v_{ле}(t)$ використовується залежність, яка отримана в роботі [6]:

$$v_{ле}(t) = \frac{1}{C_{ле} \eta_e} \times \left\{ V \frac{dC(t)}{dt} - \left[v_s k_{ф} C_{ф} \eta_{ф} + C_{ом}(t) v_{ом} \eta_{ом} - v_n C(t) \right] \right\}. \quad (2)$$

Залежності (1), (2) дозволяють більш адекватно прогнозувати характер зміни концентрації як на стадії зростання, так і на стадії зниження, в залежності від зміни швидкості подачі легуючого електрода. Зі збільшенням по лінійному закону швидкості його подачі (рис. 2, крива 1) характер зміни складу, отриманий розрахунком по залежності (1), залежить від об'єму зварювальної ванни (криві 3, 4). При цьому для об'єму зварювальної ванни (до 8...10 см³) зміни $C(t)$ по залежності (1) значно

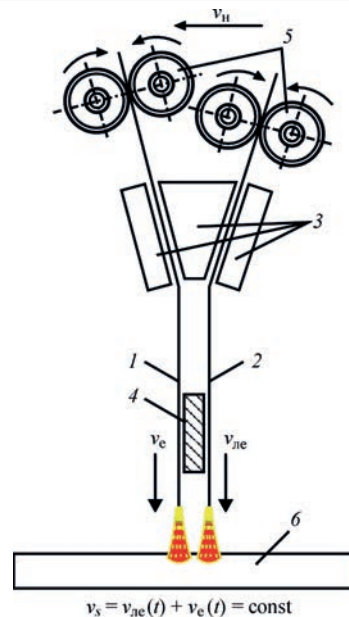


Рис. 1. Схема наплавлення двома стрічковими електродами: 1 — низьколегований електрод; 2 — легований електрод; 3 — напрямлювачі; 4 — токопідвід; 5 — подаючі ролики; 6 — основний метал; v_n — швидкість наплавлення

відрізняються від розрахованих по залежності, наведеної в роботі [5]. Однак для даної в цій роботі ванни об'ємом до 40...50 см³, що утворюється в процесі електрошлакового переплаву, результати обох розрахунків збігаються.

Результати дослідження на розглянутій в цій статті моделі при різних варіантах законів зміни швидкості об'ємної подачі легуючого електрода і їх порівняння з результатами експерименту дозволяють зробити висновок про адекватність моделі і можливості її застосування для прогнозування хімічного складу шва. Це створює можливість управління процесом легування в режимі реального часу, оскільки в якості вхідного параметра використовується сигнал на обмотці двигуна подачі електрода. Моделювання також показало, що для підвищення рівня легування або скорочення часу переходу можна використовувати ефект

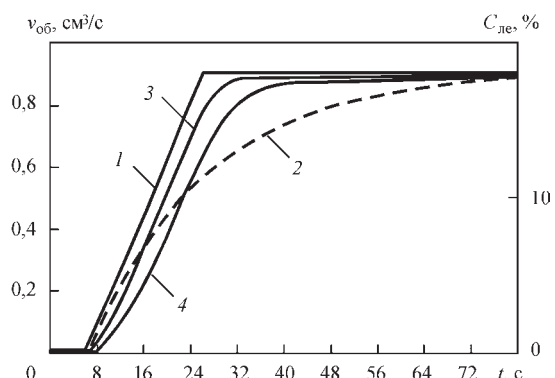


Рис. 2. Залежність характеру зміни складу шва $C(t)$ від закону змінення об'ємної швидкості подачі легуючого електрода $v_{ле}(t)$: 1 — закон зміни $v_{ле}(t)$; 2 — розрахунок $C(t)$ за даними [5]; 3 — розрахунок по залежності (1) для $V = 2$ см³; 4 — те саме, для $V = 5$ см³

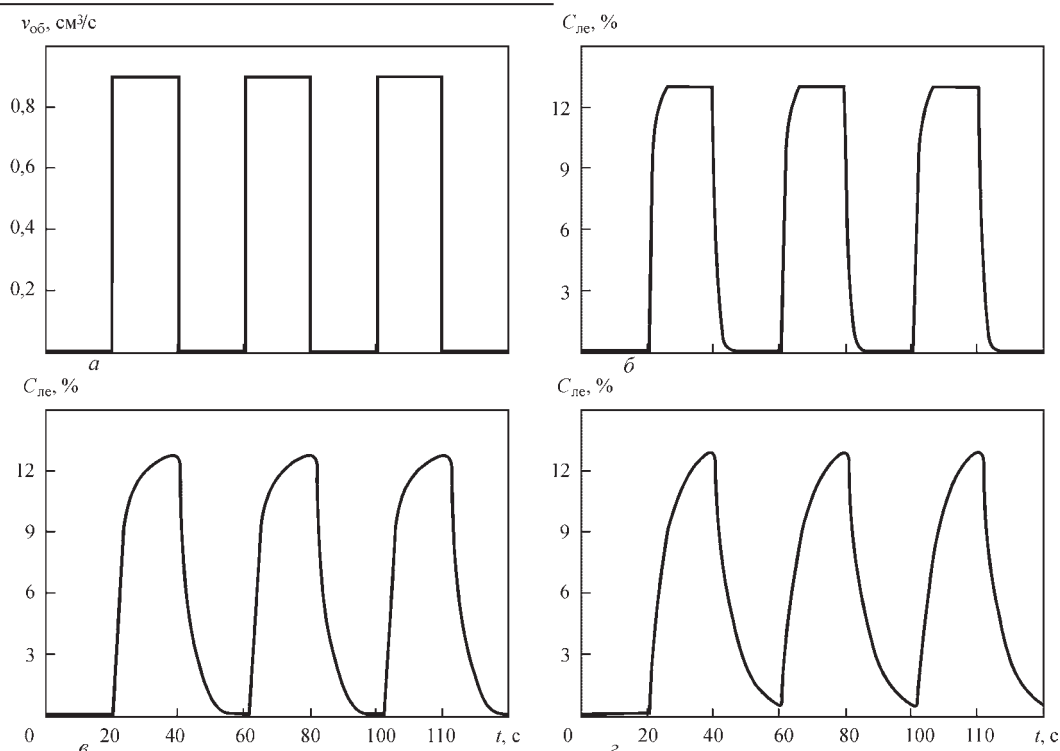


Рис. 3. Характер зміння складу шва $C(t)$ при прямокутній формі імпульсів подачі легуючого електрода: а — закон зміння $v_{\text{ог}}(t)$; б — розрахунок $C(t)$ для $V = 1 \text{ см}^3$; в — для $V = 3 \text{ см}^3$; г — те саме, для $V = 5 \text{ см}^3$

перелегування [6, 7]. Для цього законом зміни швидкості подачі під час переходу передбачається ділянка, на якій зберігається постійною максимальна швидкість, або використовуються електрооди з більш високим вмістом легуючого елемента, ніж це необхідно для отримання необхідної концентрації в шві. Однак необхідність використання (неможливість заміни) високолегованого електроода за межами ділянки перелегування супроводжується значним зростанням витрат і застосування даного технологічного варіанту в виробничих умовах економічно недоцільно.

За розрахунковими даними, дискретне зміння швидкості подачі легуючого електроода $v_{\text{ле}}(t)$ забезпечує близьке до стрибкоподібного зміння складу $C(t)$ (рис. 3). Таке дискретне зміння вмісту легуючих елементів на практиці в більшості випадків реалізується за допомогою складеного (по довжині) електроода. Як видно з рис. 3, в разі прямокутної форми імпульсу швидкості подачі, високий градієнт легування на початковій стадії висхідної гілки знижується на її кінцевій стадії аж до плавної зміни $C(t)$. Характер таких змін на низхідній гілці є аналогічним. За допомогою моделювання виявлено, що незалежно від об'єму зварювальної ванни і параметрів часу, при симетричній формі імпульсу розподіл легуючого елемента на стадії зростання і зниження концентрації є несиметричним.

Така несиметричність проявляється в меншій мірі для трапецеїдальної форми імпульсу подачі,

особливо зі зменшенням об'єму зварювальної ванни (рис. 4). У той же час, за експериментальними даними [6, 7], ці ділянки на кривій розподілу легуючих елементів в наплавленому металі відрізняються в меншій мірі. Більш того, змінюючи нахил функції швидкості подачі легуючого електроода в ту або іншу сторону, вдається забезпечити симетричність гілок зростання і зниження концентрації легуючих елементів в шві [8]. З огляду на вплив знака градієнта на вигляд кривої зміни концентрації, характерний для центральної, а не осової симетрії, симетричність гілок зростання і зниження концентрації забезпечується шляхом розбиття кривої зміни концентрації на ділянки з різним законом швидкості подачі легуючого електроода. Як показали результати моделювання, при наявності двох ділянок на стадії зростання і зниження швидкості подачі електроода, симетричність зміни легування шва забезпечується для вирішення цілої низки завдань дослідження і розробки технології наплавлення металу змінного хімічного складу.

Зміна параметрів синусоїдального закону об'ємної швидкості подачі електроода дозволяє отримати подібний закон розподілу легуючих елементів по довжині шва (рис. 5). При цьому зміння рівня легування металу шва в напрямку вектора швидкості наплавлення дає можливість отримати шар змінного складу і твердості.

Відомі способи і пристрої, що дозволяють реалізувати синусоїдальний закон зміни швидкості подачі електроодного дроту і стрічки [9, 10]. Неза-

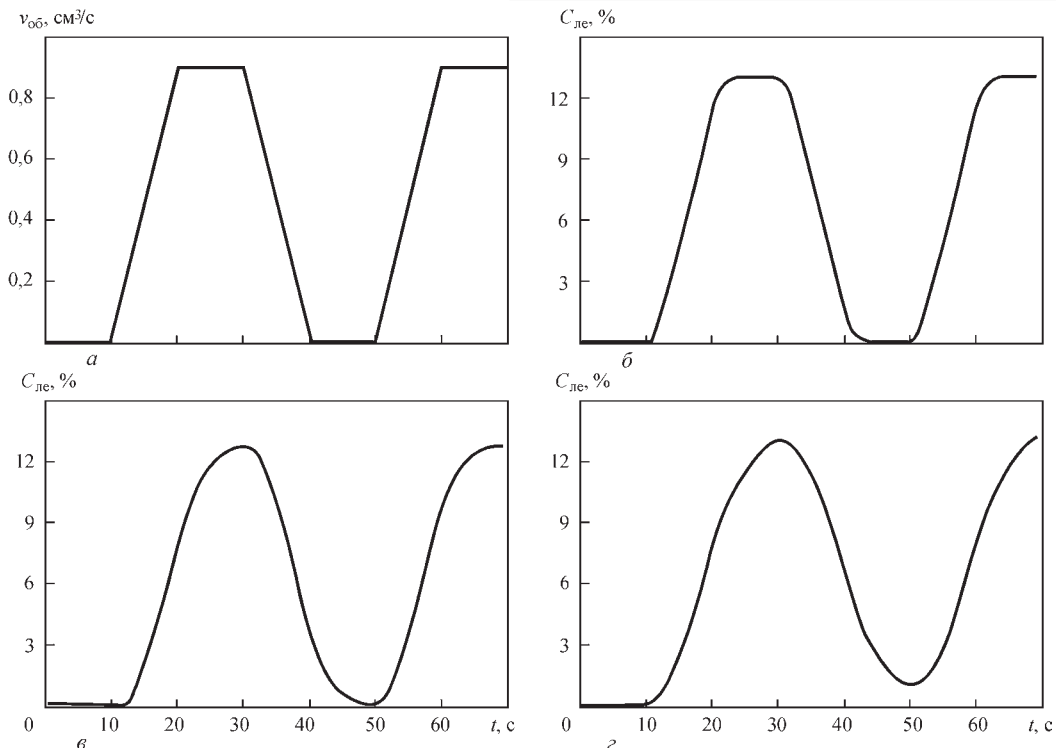


Рис. 4. Змінення складу шва $C(t)$ при трапецеїдальній формі імпульсів подачі легуючого електрода: a — закон змінення $v_{le}(t)$; b — розрахунок $C(t)$ для $V = 1 \text{ cm}^3$; v — для $V = 3 \text{ cm}^3$; z — те саме, для $V = 5 \text{ cm}^3$

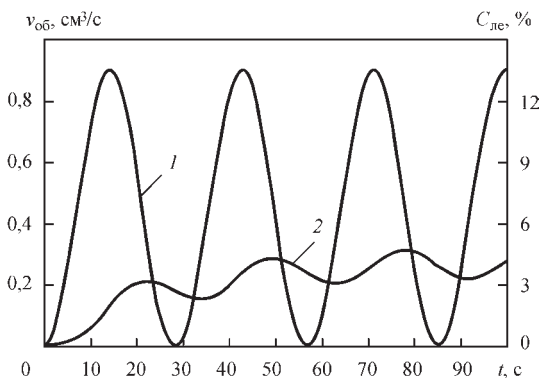


Рис. 5. Вплив синусоїдальної форми імпульсів подачі легуючого електрода на зміну $C(t)$: 1 — закон змінення $v_{le}(t)$; 2 — розрахунок $C(t)$ ($V = 3 \text{ cm}^3$)

лежно від способу створення коливань, діапазон параметрів, використовуваний в таких пристроях, дозволяє управляти характеристиками перенесення електродного металу, але не дозволяє управляти зміною хімічного складу шва через інерційність процесу формування зварювальної ванни. Наплавлення ділянок зварного шва, що відрізняються за хімічним складом, залежить від можли-

вості забезпечити змінення по періодичному закону швидкості подачі електродів з різним ступенем легування. При цьому тривалість і шпаруватість імпульсів подачі повинна значно перевищувати час існування зварювальної ванни, крім того, необхідно забезпечити можливість змінювати ці параметри в широкому діапазоні.

Для реалізації завдання програмного управління швидкістю подачі електродів, на базі програмованого мікроконтролера ATmega328P розроблена схема управління колекторними двигунами постійного струму типу СЛ (рис. 6). Програмування контролера і управління роботою системи здійснюється із застосуванням персонального комп'ютера, підключеного за допомогою вбудованого конвертера інтерфейсів USB-UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Для формування імпульсів струму керування приводами подачі електродів з різним складом легуючих елементів використано стандартний тиристорний перетворювач. Змінна напруга живлення схеми випрямляється і модулюється сигналами ШІМ,



Рис. 6. Структурна схема системи управління двигунами подачі електродів

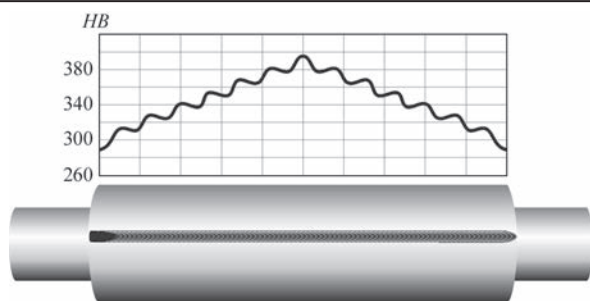


Рис. 7. Розподіл твердості вздовж бочки прокатного валка при формуванні наплавленого шару з поздовжніх швів

які надходять на керуючий вивід тиристора з дискретного виходу контролера. Це дозволяє забезпечити управління швидкістю подачі електродів відповідно до залежностей, наведених на графіках (рис. 3–5). При цьому тривалість окремих ділянок порівнянна з часом існування зварювальної ванни.

На основі результатів моделювання процесу наплавлення шару змінного хімічного складу розроблена технологія відновлення робочих валків обтискний кліті безперервно-заготовочного стану (матеріал валків сталь 50ХН, діаметр бочки 600 мм, довжина бочки 1000 мм). Відомо, що розтріскування під впливом термовтомного і ударного навантаження, пов'язане з утворенням кільцевих тріщин, які глибоко проникають в тіло валка, різко посилюється при виконанні поверхневого шару з кільцевих швів [11]. Тому наплавлений шар формувався зі швів, орієнтованих уздовж твірної бочки [12], що дозволило підвищити опір утворенню кільцевих тріщин в поверхневому шарі валка гарячої прокатки під впливом циклічних тепловмінів. При використанні електродної стрічки перетином 40×0,65 мм (легований електрод складу Св-2Х13, а низьколегований електрод — 30ХГСА) шов змінного складу, наплавлений уздовж твірної бочки валка, характеризується змінням вмісту хрому від 1,12 до 12,6 %. При цьому твердість наплавленого шару після відпуску зростає від *НВ* 290 до *НВ* 390, відповідно (таблиця).

Синусоїдальний вид імпульсів подачі легуючого електрода дозволяє отримати представлений на рис. 7 характер зміни твердості — від мінімальної величини на краях до максимальної величини в середній частині бочки, що значно знижує нерівномірність зносу робочих валків обтискний кліті безперервно-заготовочного стану.

Висновки

1. Математичне моделювання технології наплавлення швів змінного хімічного складу дозволяє прогнозувати зміння вмісту легуючих елементів на ділянці переходу, залежне від швидкості подачі легуючого електрода і об'єму зварювальної ванни.

Склад і твердість наплавленого шару по довжині валка

Вміст хрому і твердість	Розташування ділянки на бочці валка		
	на краю бочки	на відстані ¼ довжини від краю	в середині бочки
Вміст хрому, мас. %	1,12	6,2	12,6
Твердість <i>НВ</i> *	<u>340</u> 290	<u>410</u> 340	<u>450</u> 390

* Чисельник — після наплавлення; знаменник — після відпуску при $T = 430$ °С.

Адекватність моделі підтверджується результатами експерименту.

2. Шляхом моделювання виявлено, що зміння складу шва, близьке до дискретного, може бути отримано в разі використання закону подачі легуючого електрода у вигляді імпульсів трапецеїдальної форми. Несиметричність одержуваних при цьому ділянок зростання і зниження концентрації в шві легуючих елементів проявляється в меншій мірі зі зменшенням об'єму зварювальної ванни.

3. На основі моделювання розроблена технологія зміцнення прокатних валків з формуванням наплавленого шару з розташованих уздовж бочки швів змінного по довжині складу і твердості шляхом зміни об'ємної швидкості подачі легуючого електрода у вигляді імпульсів синусоїдальної форми.

Список літератури

1. Перемиський В.В., Панфилов А.И. (2017) Дуговая наплавка слоев переменного химического состава и различной твердости. *Автоматическая сварка*, 7, 48–52.
2. Shebanits E.N., Omelyanenko N.I., Kurakin Yu.N. et al. (2012) Improving the fracture toughness and wear resistance of hard-faced hot-rolling-mill rolls. *Metallurgist*, 56, 7–8, 613–617.
3. Лещинський Л.К., Матвієнко В.М., Мазур В.О. (2017) Спосіб виготовлення ролика машини безперервного лиття заготовок. Україна, Пат. 119373.
4. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) Теория и практика наплавочных работ. Киев, Экотехнологія.
5. Bennett A.P. (1972) Prediction and control of composition profiles in graded transition joints. *Metals and Materials*, 3/4, 146–149.
6. Лещинский Л.К., Литвин Н.Н., Иванов С.Г. и др. (1983) Методика расчета процесса легирования швов переменного химического состава. *Автоматическая сварка*, 11, 27–29.
7. Гулаков С.В., Носовский Б.И. (2005) Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств. Мариуполь, Новый мир.
8. Лещинський Л.К., Иванов В.П. (2018) Спосіб наплавлення шару змінного хімічного складу. Україна, Пат. 124035.
9. Лебедев В.А. (2007) Зависимость между скоростями импульсной подачи проволоки и ее плавления при сварке с короткими замыканиями. *Автоматическая сварка*, 4, 19–22.
10. Ivanov V., Lavrova E. (2014) Improving the Efficiency of Strip Cladding by the Control of Electrode Metal Transfer. *Applied Mechanics and Materials. Trans. Tech. Publications*, 682. Switzerland, 266–269.
11. Щетинин С.В., Щетинина В.И., Степнов К.К. и др. (2010) Повышение трещиностойкости бандажированных опорных валков. Захист металургійних машин від поломок. *Зб. наук. праць. ПДТУ*, Мариуполь, 12, 226–230.

12. Лещинський Л.К., Степнов К.К., Матвієнко В.М. (2014) *Спосіб виготовлення прокатних валків*. Україна, Пат. 92559.

References

1. Peremitko, V.V., Panfilov, A.I., (2017) Arc surfacing of layers of metal of varying composition and hardness. *The Paton Welding J.*, **7**, 38-42.
2. Shebanits, E.N., Omelyanenko, N.I., Kurakin, Yu.N. et al. (2013) Improving the fracture toughness and wear resistance of hard-faced hot-rolling-mill rolls. *Metallurgist*, **56(7-8)**, 613-617.
3. Leshchinsky, L.K., Matvienko, V.M., Mazur, V.O. *Method of manufacture of roll of billet continuous casting machine*. Ukraine Pat. 119373 [in Ukrainian].
4. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
5. Bennett, A.P. (1972) Prediction and control of composition profiles in graded transition joints. *Metals and Materials*, **3/4**, 146-149.
6. Leshchinsky, L.K., Litvin, N.N., Ivanov, S.G. et al. (1983) Procedure for calculation of alloying process of varying composition welds. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 27-29 [in Russian].
7. Gulakov, S.V., Nosovsky, B.I. (2005) *Surfacing of working layer with regulated distribution of properties*. Mariupol, Novyj Mir [in Russian].
8. Leshchinsky, L.K., Ivanov, V.P. *Method of surfacing of varying composition layer*. Ukraine Pat. 124035 [in Ukrainian].
9. Lebedev, V.A. (2007) Dependence between the rates of pulsed wire feed and wire melting in welding with short-circuiting. *The Paton Welding J.*, **4**, 17-20.
10. Ivanov, V., Lavrova, E. (2014) Improving the efficiency of strip cladding by the control of electrode metal transfer. *Applied Mechanics and Materials. Trans. Tech. Publications*, **682**. Switzerland, 266-269.
11. Shchetinin, S.V., Shchetinina, V.I., Stepnov, K.K. et al. (2010) Improvement of crack resistance of shrouded backup rolls. Breakage protection of metallurgical machines. *Zh. Nauk. Prats PDTU*, Mariupol, **12**, 226-230 [in Ukrainian].
12. Leshchinsky, L.K., Stepnov, K.K., Matvienko, V.M. *Method of manufacture of forming rolls*. Ukraine Pat. 92559 [in Ukrainian].

MODELING THE TECHNOLOGY OF DEPOSITION OF A LAYER OF VARIABLE CHEMICAL COMPOSITION

V.P. Ivanov, L.K. Leshchinskiy, S.V. Scherbakov

SHEI «Pryazovskyi State Technical University» of MES of Ukraine. 7 Universitetska Str., 87500 Mariupol.
E-mail: ivanov_v_p@pstu.edu

It is shown that the nature of the change of chemical composition of the weld (deposited metal) is determined by the law of control of volume feed rate of the alloying electrode, which was derived by mathematical modeling of the effect of surfacing technology on the process of weld pool alloying. It is found that the high gradient of variation of chemical composition along the weld length is ensured by a discrete change of the volume feed rate of the alloying electrode. At a rectangular waveform of the electrode feed pulse, the alloying element distribution in the weld metal is asymmetrical at the stage of increase and decrease of the concentration that is manifested to a greater extent with increase of weld pool volume. Experimentally confirmed calculation results are presented, which show that the trapezoidal shape of the pulse allows reducing the asymmetrical nature of variation of the composition. It is found that the nature and gradient of alloying element distribution in the weld can be changed at pulsed feed of the alloying electrode by a sinusoidal law. Conditions of forming a deposited layer of variable composition and hardness along the length of the barrel of a rolling roll of continuous billet mill were determined. 12 Ref., Tabl. 1, 7 Fig.

Keywords: mathematical modeling, weld pool, deposited metal, variable chemical composition, alloying electrode, feed pulse shape, rolling roll, variable hardness along the barrel length

Поступила в редакцію 11.07.2019



TUBE 2020, WIRE 2020 — 17-я Международная выставка трубопроводов, труб, проволоки, кабеля и метизов, технологий и оборудования для их производства

30.03.2020–03.04.2020 Германия, Дюссельдорф, Messe Düsseldorf Exhibition Centre

Tube. Трубные материалы, трубы, комплектующие: трубы на базе стали, нержавеющая сталь, трубы из цветных металлов и сплавов (алюминий, бронза, медь и т.п.), трубы пластмассовые, трубы из минерального сырья (бетон, керамика), трубы различных методов изготовления и обработки, сварка, холодная и горячая вытяжка, прессование, гальванизированные трубы, с напылением или покрытием определенным слоем, проводные трубы, дренажи, системы отвода, трубы для обмена и передачи тепла, техника сверления, измерительная техника, конструкционные трубы из стали и т.п., комплектующие (арматуры, уплотнители, соединители, запоры, гайки, винты).

Оборудование для изготовления труб: различные виды литья, прокатные станы, прессы, сварка, тепловая обработка, установки по обработке труб — формование, гибка, резка, шлифование; логистика, системы управления и контроля; упаковка. Оборудование бывшее в употреблении. Инструменты для различных технологий и вспомогательная техника: литье, прессование, волочение, прокат, сварка. Регулирующая и измерительная техника и техника управления. Испытательное, контрольное оборудование. Специализированные разделы: охрана окружающей среды, техника безопасности, специальная литература, консультации.

Wire. Оборудование и машины для изготовления проволоки и ее обработки; оборудование для производства метизов из проволоки. Готовая продукция. Специализированная проволока или кабель; контрольное оборудование и др. Станки, инструменты и технологии для литейного дела, экструзии, протяжки. Оборудование и машины для изготовления кабелей, пружин и креплений. Вспомогательные материалы для производства проволоки и кабеля (смазочные, чистящие, смачивающие вещества).

PECULARITIES OF ELECTRON BEAM WELDING OF HOT-ROLLED ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS*

D. Drimal, M. Kasencak, F. Kolenic, A. Kramarcik, L. Kovac

PRVA ZVARACKA a. s. Kopcianska 14, 85101, Bratislava, Slovak Republic. E-mail: drimal.daniel@pzvar.sk

This paper presents results of experiments on electron beam welding of Al–Li alloys. The wrought AW 2099 alloy was used as experimental material. AW 2099 alloy in T83 condition of thickness 25 mm was used. The microstructure of experimental alloy was degraded by annealing and deformation before welding. The original thickness 25 mm was reduced to 3 mm by hot rolling without any subsequent additional heat treatment. The full penetration butt-welds and T-joint configurations were made by electron beam. These welded joints underwent investigation of basic mechanical testing (tensile strength, bending, hardness) and metallographic inspection for internal defects and microstructure identification. Welded joints didn't have significant internal defects, but tensile strength and plastic properties were deteriorated significantly by welding process and previous deformation. The heat treatment was performed for improvement of mechanical and plastic properties. The heat treatment mode consists of solution treatment (annealing) followed by quenching and subsequent aging cycles. 5 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

Keywords: *aluminum-lithium alloys, electron beam welding, macrostructure of weld, tensile strength test*

Aluminium alloys alloyed by lithium can be included in the category of high strength light alloys. These alloys are mostly used in aviation and space industry. Lithium as alloying element results into reduction of specific weight and increase of modulus of elasticity, while lithium effect is much stronger compared to others alloying elements. Addition of Li promotes formation of strong strengthening phases and increase of fatigue crack resistance. Recent investigations of Al–Li alloys resulted in formation of new generation of alloys. These alloys are characterized by not only weight reduction, but also improvement of properties such as corrosion resistance, good strength and ductility, and workability such as machining, forging, bending, and welding [1–4].

To get best results of Al–Li alloys in terms of mechanical properties it is necessary to perform T8 treatment. The treatment consists of solution treatment, quenching, cold deformation and artificial treatment, which is a key factor to achieve desired structure and uniform precipitation. Cold deformation is necessary for generation of dislocation network that works as nuclei for strengthening phases formation with finer microstructure and development of conditions for precipitation in grain boundary regions. Phases on grain boundaries are unfavourable in terms of material toughness.

The Al–Li alloys are grouped by weldability [5]. Degradation of structural and mechanical properties of weld metal and HAZ should be taken into account due to welding heat cycle. The welding methods with

limited heat input are favourable for joining Al–Li alloys. The most common defects in fusion welds and HAZ are porosity, hot cracks and microstructure degradation. Porosity is caused mainly by lithium reactivity. Lithium is present in structure not only in form of phases, but also in form of different compounds (such as carbonate, hydroxide or hydride). These compounds decay due to effect of heat and form various gases that can be entrapped in the weld metal mostly in the weld root area. Porosity can be reduced by mechanical or chemical treatment of surface or weld metal stirring. Hot cracking susceptibility is caused by formation of low melting eutectics. Formation of hot cracks can be suppressed by using pulse current, reduction of heat input, reduction of stresses in welded joint area or by combination of these methods. Mechanical properties of Al–Li alloys welded joints can be reduced to 50 % of mechanical properties of base metal. Mechanical properties degradation in weld metal and HAZ is caused by increase of phases that cannot be used for strengthening. Using welding methods allowing limitation of heat input is preferable for Al–Li alloy joining. The compressor impellers working in less aggressive environments can be the next application field of Al–Li alloys. Low specific weight and favourable mechanical properties allow reducing moment of inertia and therefore energy consumption of these machines. Impeller wheels of compressors are parts with complex shape and their production without joining technologies is in some cases extremely expensive and sometimes impossible. The

*Based on materials presented at IX International Conference «Beam Technologies in Welding and Materials Processing», September 9–13, 2019, Odessa, Ukraine.



Fig. 1. Workplace of electron-beam complex PZ EZ 4

impeller consists of two hub discs among which are slots. There are number of different designs and manufacturing approaches with some advantages and disadvantages. And the production issues are caused primary by difficult-to-reach welded joint. Two basic types of impeller design are welded by electron beam in PRVÁ ZVÁRAČSKÁ a. s. Company. The first design is based on two hub discs fabricated by milling and each disc includes half of the blade. Discs are joined by butt weld in the middle of the blade. Another design is chosen for impellers with narrow channel (less than 4 mm). In the case of narrow channel impeller, one hub disc is milled with full blade and impeller is covered by second disc. The second hub disc is joined to the blades by T-weld.

Methods and materials. The aim of the work was to investigate possibilities of production of propeller wheels made of Al–Li alloys by electron beam welding and evaluate the achieved results of mechanical properties.

The technology development and experiments were carried out on an experimental classification — PZ EZ 4 (Fig. 1). The universal electron beam complex for welding and surface treatment of materials is equipped with 3-axis positioning system continuously controlled and synchronized with technology. For powering the electron gun, the PZ EB 2.5 — 15 is used to generate an electron beam with accelerating voltage up to 60 kV and output up to 15 kW. The arbitrary waveform generator ETC M631 is integrated

Table 1. Nominal chemical composition of AW 2099 alloy

Element	Content, wt. %	Element	Content, wt. %
Cu	2.4–3.0	Ti	0.10 max
Li	1.6–2.0	Fe	0.07 max
Zn	0.4–1.0	Si	0.05 max
Mg	0.10–0.50	Be	0.0001 max
Mn	0.10–0.50	Others, Each	0.05 max
Zr	0.05–0.12	Others, Total	0.15 max

into the control system, which is used to control the electron beam deflection system.

AW 2099 alloy. Wrought AW 2099 alloy was used as experimental material (Tabl. 1). AW2099 alloy was used in T83 condition with thickness 25 mm. The microstructure of experimental alloy was degraded by annealing and deformation before welding. The original thickness 25 mm was reduced to 3 mm by hot rolling without any subsequent additional heat treatment. The full penetration butt-welds and T-joint configurations were made by electron beam.

These welded joints underwent visual inspection, basic mechanical tests (tensile strength, bending, hardness) and metallographic examination for internal defects and microstructure identification.

Heat treatment. The part of welded samples was subjected to heat treatment. Heat treatment consists of solution treatment at $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 90 minutes followed by quenching into water. Next step was artificial ageing at temperature $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 18 hours. The temperatures and times for heat treatment have been chosen on the basis of available information from literature.

The research of joining technology was carried for both previously mentioned designs (butt weld — BW — blade joining and T-weld disc and blade joining. The welding procedures were proposed based on experiences with welding of titanium and steel impellers for both approaches. Because of preliminary tests and cost reduction the welding experiments were performed only with model impellers. Only blades were fabricated from AW 2099 alloy. The model discs were fabricated from mild steel and contained the slot in which the blades were inserted. The straight blades’

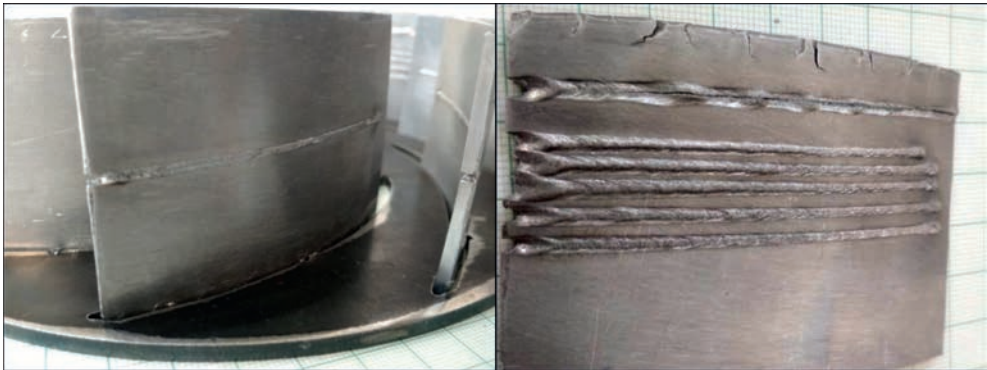


Fig. 2. Model impeller with test blade

Table 2. Final welding parameters for joining impeller by EBW through blade

Accelerating voltage U , kV	55
Initial welding current I_w , mA	40
Welding speed v_w , mm·s ⁻¹	25
Initial focal current I_f , mA	800
Final defocus I_f , mA	+10
Dynamic deflection	$\sin 1500 \text{ V}/\cos 1500 \text{ V};$ $(0.5 \text{ mm})f= 1000 \text{ Hz}$

design was used for samples with regard to further investigation of mechanical properties.

Butt weld – blade welding. Welding process parameters were adjusted based on trials with model impellers (Fig. 2). The welding process was developed for constant accelerating voltage $U = 55 \text{ kV}$. The welding current speed and focal position were set to achieve full penetration of the blade. Final parameters are listed in Tabl. 2.

Production of T-weld to the blades through hub disc. Joining by T-weld through hub disc is used in case of narrow channel where BW – blade joining cannot be used because of electron beam dimensions. In this case the blade is part of hub disc and joint is formed by melting of blade disc interface. The welding process and test samples were made using simple T-joint configuration from AW 2099 sheets of 3.0 mm for simplification. The weld penetration is not the main factor of weld strength in the case of T-weld. The weld strength is determined by weld width in the disc-blade interface. However, this weld width is limited by blade thickness and its thermal capacity. This unwelded area not only reduces effective weld width, but also acts as notch in the weld. The notch effect can

Table 3. Final welding parameters for joining impeller by T-weld through disc

Accelerating voltage U , kV	55
Initial welding current I_w , mA	45
Focal current I_f , mA	807
Welding speed v_w , mm·s ⁻¹	30

be reduced by inserting brazing filler material to the joint and by application of hybrid welding process to some extent.

Advantage of this method is constant welding process over the entire length of the blade without necessity of change of welding current or focal position. Another benefit is absence of spatter in the impeller channel, in case of proper process setup.

At the same time the determination of actual weld penetration, as well as nonwelded area dimensions are complicated when ultrasonic testing method is applied.

Welding parameters were set by trials based on full penetration welding of sheet of 3.0 mm thickness. The set welding current was increased by 5 mA to secure sufficient penetration to the blade. The circular pattern dynamic deflection of electron beam was used to increase weld width in the disc-blade interface. Used welding parameters are listed in Tabl. 3.

Results. Surface of samples of butt weld was uniform without significant imperfections such as undercut, excessive weld metal, surface porosity, cracks or spatters. Visual inspection of BW indicated excessive penetration. The root height was less than 0.5 mm over the whole weld length (Fig. 3). Penetration inspection does not reveal any indications.

The surface of T-weld was uniform over the entire weld length without presence of spatters, porosity or

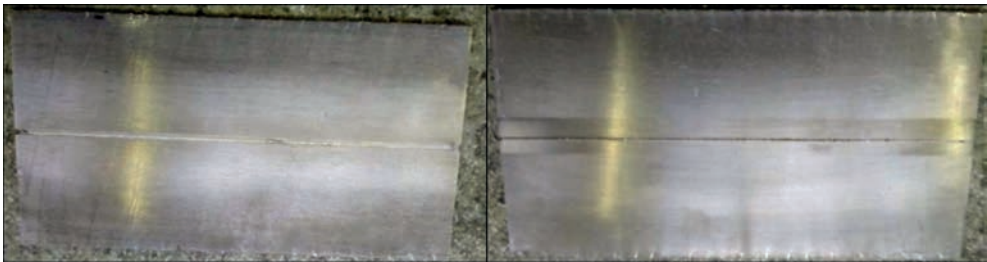


Fig. 3. Surface and root of butt weld sample

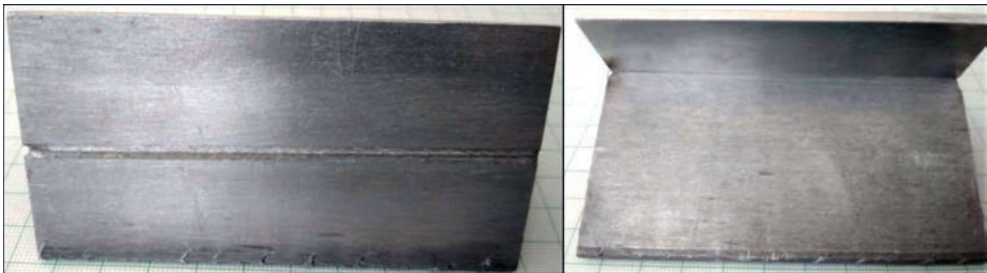


Fig. 4. Surface of T-weld

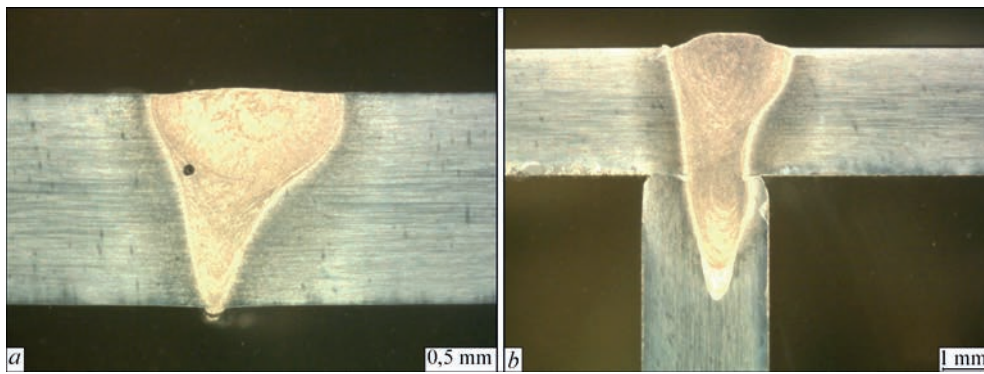


Fig. 5. Macrostructure of weld without heat treatment: *a* — BW; *b* — T-weld

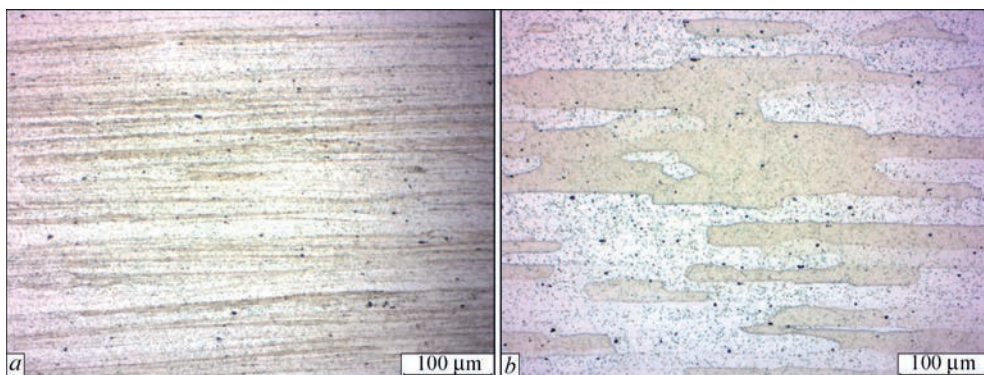


Fig. 6. Microstructure of base metal: *a* — without heat treatment; *b* — with heat treatment

cracks. No root penetration was observed out of blade material (Fig. 4).

Macrostructure. Macrostructure of butt (Fig. 5, *a*) weld reveals weld with full penetration without presence of any cracks. The weld metal includes one pore with diameter approx. 0.1 mm. HAZ is not significant and its width is up to 1.5 mm. Width of weld metal reaches 2.7 mm on the surface. Measured root width is 0.5 mm. The shape of weld shows some asymmetry probably because of fixture residual magnetisms.

T-weld (Fig. 5, *b*) is not placed perfectly in the axis of blade and weld axis is shifted by 0.3 mm. Weld is 1.4 mm wide on the disc-blade interface and this width is proportional to T-weld strength. HAZ is not very significant similarly to BW.

Microstructure. Microstructure of base metal consists of grains elongated in the rolling direction

with precipitated strengthening particles (Fig. 6, *a*). The nature of microstructure does not change noticeably after heat treatment (solution annealing with water, quenching and artificial ageing) only grain growth can be observed and phases are finer (Fig. 6, *b*).

We can observe surface appearance changes in the HAZ because of recrystallization during welding cycle (Fig. 7, *a*). The fusion zone is formed by fine globular grains. The structure shows some grain growth after heat treatment cycle.

Weld metal has columnar shaped grains near the fusion zone. The axis of the grains is oriented in the steepest heat gradient. The columnar grains are transformed into polyedric grains. The phases are mainly in the grain boundary region in case of samples without heat treatment cycle (Fig. 8, *a*). The grain growth also takes place in weld metal during heat treatment

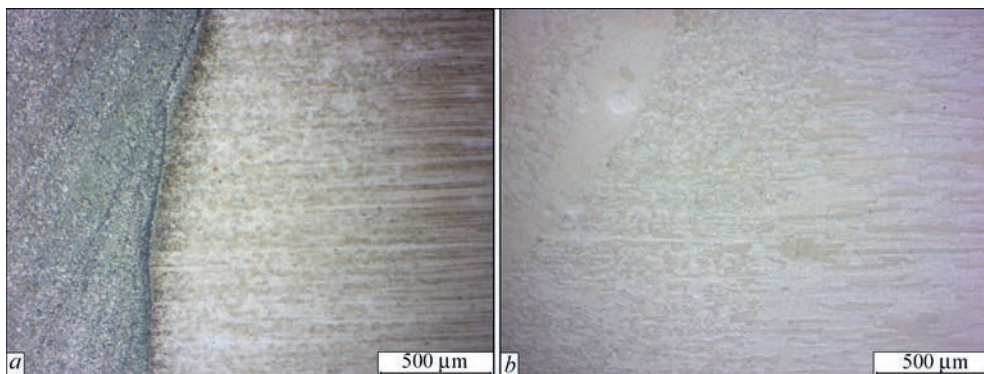


Fig. 7. Microstructure of HAZ: *a* — without heat treatment; *b* — with heat treatment

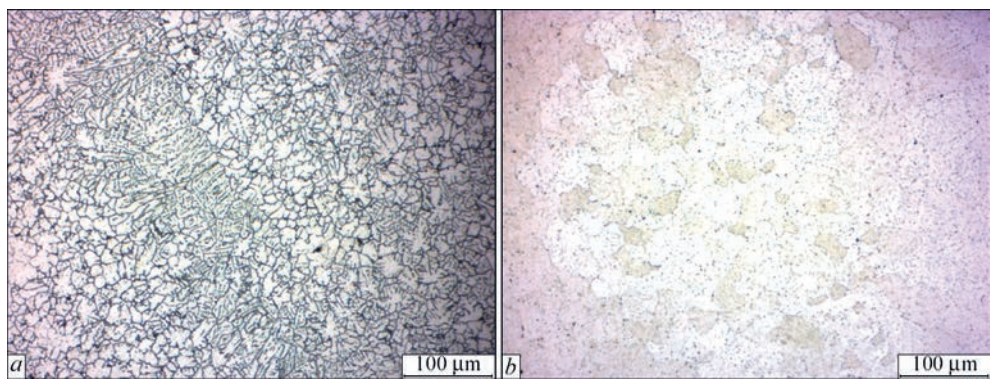


Fig. 8. Microstructure of weld metal: *a* — without heat treatment; *b* — with heat treatment

Table 4. Result of tensile strength test of weld joints with and without heat treatment cycle

Sample	Yield strength, $R_{p0.2}$, MPa			Tensile strength, R_m , MPa			Note
Base metal without heat treatment	410.5	405.2	407.4	434.3	428.3	428.0	$A = 2 \%$
BW without heat treatment	—	—	—	281.1	284.0	282.8	Failure in fusion zone
BW with heat treatment	283.7	284.5	278.3	409.0	405.7	407.0	Failure in base metal
T-weld without heat treatment	—	—	—	58.5	58.6	58.2	Failure in weld metal
T-weld with heat treatment	109.3	114.0	114.9	128.0	133.3	132.5	Failure in weld metal

Table 5. Results of bend test of butt welded joints with and without heat treatment cycle

Sample	Bend angle, °			Failure localization
BW without heat treatment	16	11	9	Failure in weld metal
BW with heat treatment	180	180	180	No failure

cycle (Fig. 8, *b*). And the phases distribution is more uniform and phases are fine after heat treatment cycle (Fig. 8, *b*).

The static tensile strength (Tabl. 4) and bend test (Tabl. 5) were performed so far. The base metal after solution treatment and thickness reduction from 25.0 mm to 3.0 mm reaches tensile strength over $R_m = 428$ MPa and yield strength $R_{p0.2} = 405$ MPa, but elongation was only $A = 2 \%$. The degradation of mechanical properties due to heat cycle takes place as expected. The tensile strength decreased by a third to over 281 MPa for the butt weld. Measured tensile strength was only 58 MPa in case of T-weld. This significant drop is also verified by calculation. The width of the blade was taken for calculation, not only weld width. The heat treatment cycle allows restoring to 94 % (over 405 MPa) of the original tensile strength in case of butt weld. Tensile strength was doubled by heat treatment to the value of over 128 MPa for T-weld. The failure of the samples without heat treatment occurs in fusion zone during tensile tests. The strength of weld metal was higher in comparison with base metal after heat treatment and therefore the failure takes place in base metal.

The bend test was performed with mandrel of $D = 35$ mm diameter with regard to the low plastic properties of original base metal ($A = 2 \%$). This size of mandrel was used also for bend test of welded joints after heat treatment for better comparison. Samples

of butt weld without heat treatment cycles rupture at bend angle from 9° to 16° . The failure was located in weld metal in all cases. No failure was observed after bend test of samples with heat treatment at bend angle of 180° (Tabl. 5).

Conclusions

The achieved result showed suitability of chosen approach for application of Al–Li alloys in production of low stressed impeller with reduced power consumption. Proper setup of electron beam process results in production of sound welds with high quality. Over 94 % of original value of tensile strength was reached for butt weld using heat treatment cycle for improvement of the plastic properties. Bend angle of 180° was achieved for these samples.

The negative effect of welding heat impact on mechanical properties was identified as expected. This negative impact can be effectively suppressed by heat treatment cycle after welding. Optimum combination of solution treatment temperature and time together with artificial ageing can restore the properties almost to the original values.

It is necessary to focus on the way how to increase the width of T-weld to the maximum achievable size to secure the highest strength of the welded joint.

Further work has to be done in the field investigation of dynamical properties and parameters for optimization of heat treatment cycle in or-

der to increase mechanical and plastic properties.

Acknowledgments. *This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-15-0337, APVV-16-0300, APVV-17-0432 and by Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic within the project Req-00048-0005.*

References

1. Hrivňák, I. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. (2009) V Bratislave: Slovenská technická univerzita. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
2. Metalwebnews: Lithium aluminium alloys — the new generation aerospace alloys. Metal Web News, ©2007 <https://web.archive.org/web/20070928094349/http://www.metalwebnews.com/howto/alloys/alloys.pdf>
3. Lin Y., Zheng Z.Q., Li S.C. (2013) *Effect of solution treatment on microstructures and mechanical properties of 2099 Al–Li alloy*. [cit. 2019-01-24]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.07.005>
4. Rioja, Roberto J., Liu John. (2012) The evolution of Al–Li base products for aerospace and space applications. *Metallurgical and Materials Transact. A*. Springer, US, 43(9), 3325–3337. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>
5. Wang, S., Huang Y., Zhao L. (2017) *Effects of different aging treatments on microstructures and mechanical properties of Al–Cu–Li alloy joints welded by electron beam welding*. [cit. 2019-01-24]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.07.002>

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ГАРЯЧЕКАТАНИХ АЛЮМІНІЄВО-ЛІТІЄВИХ СПЛАВІВ

D. Drimal, M. Kasencak, F. Kolenic, A. Kramarcik, L. Kovac

PRVA ZVARACKA a. s. Kopčanská 14, 85101, Братислава, Словацька Республіка. E-mail: drimal.daniel@pzvar.sk

У даній роботі представлені результати експериментів з електронно-променевого зварювання сплавів Al–Li. Прокат зі сплаву AW 2099 в поставці T83 товщиною 25 мм був використаний в якості експериментального матеріалу. Мікроструктура експериментального сплаву була деградована після відпалу та деформації перед зварюванням. Початкова товщина 25 мм була зменшена до 3 мм гарячим прокатом без подальшої додаткової термічної обробки. Прорізні зварні шви та шви Т-з'єднання виконані електронним променем. Ці зварні з'єднання пройшли основні механічні випробування (міцність на розрив, вигин, твердість) та металографічний огляд на предмет виявлення внутрішніх дефектів та мікроструктури. Зварені з'єднання не мали значних внутрішніх дефектів, але міцність на розрив та пластичні властивості значно погіршилися внаслідок зварювального процесу та попередньої деформації. Термічну обробку проводили для поліпшення механічних та пластичних властивостей. Режим термічної обробки складається з обробки на твердий розчин (відпал) з подальшими циклами загартування та старіння. 5 Бібліогр., 5 табл., 8 рис.

Ключові слова: алюмінієво-літієві сплави, електронно-променеве зварювання, макроструктура зварного шва, випробування на міцність, на розрив

Received 18.10.2019

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

LET'S JOIN
THE WORLD!

13. – 17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ
СЕЙЧАС!

www.schweissen-schneiden.com

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1 IN THE WORLD

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

МЕТОДИКА ПРИСКОРЕНИХ КОРОЗІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОГО ВПЛИВУ АТМОСФЕРИ ПОМІРНОГО КЛІМАТУ НА ЗВАРНІ З'ЄДНАННЯ

В.В. Книш, С.О. Осадчук, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, А.О. Рибаків

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

Запропонована методика прискорених корозійних випробувань зварних з'єднань для моделювання тривалого впливу на них найбільш вагових кліматичних факторів атмосфери помірного клімату (температури і відносної вологості). Обґрунтовано тривалість прискорених випробувань зварних з'єднань у камері вологості для отримання корозійних пошкоджень, які характерні зварним з'єднанням металоконструкцій після близько 12 років експлуатації. Проведено випробування на втому стикових і таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД після попереднього напрацювання 2 млн циклів при максимальних напруженнях 150 МПа, корозійних випробувань в умовах підвищеної температури і відносної вологості без зміцнення та з подальшим зміцненням технологією високочастотної механічної проковки. Встановлено, що зміцнення технологією високочастотної механічної проковки збільшує циклічну довговічність стикових і таврових зварних з'єднань з накопиченими втомними і корозійними пошкодженнями в 10 разів. Бібліогр. 23, рис. 5.

Ключові слова: зварне з'єднання, корозійне середовище, втома, прискорені корозійні випробування, високочастотна механічна проковка, підвищення циклічної довговічності

Значна частина зварних металевих конструкцій та споруд на території України, які працюють в умовах змінного навантаження (мости, шляхопроводи, крани і т.п.), введена в експлуатацію в 1960...1980-х рр. Від впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища (корозії) дані конструкції захищають лакофарбовими покриттями. Проте в процесі тривалої експлуатації можуть відбуватися механічні пошкодження, розтріскування і відшарування лакофарбових покриттів. Це призводить до того, що зварні елементи конструкцій піддаються не тільки змінному навантаженню, а і корозійному впливу [1, 2]. Утворення корозійних пошкоджень знижує проектну товщину елементів конструкцій і характеристики опору втомі зварних з'єднань, що призводить до передчасних руйнувань [3]. У разі об'єктивної необхідності подальшої експлуатації даних конструкцій при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт слід не лише видалити продукти корозії і оновити лакофарбові покриття, але і підвищити циклічну довговічність пошкоджених корозією зварних з'єднань додатковою зміцнюючою обробкою. Для гарантованого забезпечення підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань металоконструкцій рекомендують застосовувати високочастотну механічну проковку (ВМП) [4–8]. Для встановлення ефективності застосування технології ВМП для підвищення довговічності зварних конструкцій з корозійними пошкодженнями, необхідно було прискореними випробуваннями в ла-

бораторних умовах змодельовати тривалий вплив атмосферних умов помірного клімату. Аналіз нормативних документів показав, що до недавнього часу в Україні порівняльні дослідження корозійної стійкості в атмосферних умовах конструкційних сталей проводили відповідно з методиками, представленими в нормативних документах [9–11]. Після скасування ГОСТів почали вводити в дію європейські норми [12, 13]. Проте, як в ГОСТах, так і в діючих стандартах [9–14] запропоновані лише умови випробувань або комплекс умов, що моделюють вплив корозійних чинників, але інформація про тривалість експонування зразків відсутня.

Тому мета даної роботи — розробити методику прискорених корозійних випробувань для моделювання тривалого впливу атмосфери помірного клімату на зварні з'єднання і встановити ефективність застосування технології ВМП для підвищення їх циклічної довговічності.

Розробка методики прискорених корозійних випробувань. Методику прискорених корозійних випробувань зразків розробляли для помірного клімату України. На корозійні процеси суттєво впливає тривалість циклу зволоження поверхні, протягом якого на елементах конструкції знаходиться плівка води [15, 16]. В роботі [17] помірний клімат охарактеризовано температурним інтервалом від -33 до $+35$ °C, а розрахунковий час помірної вологості вище 80 % при температурах вище 0 °C становить від 2500 до 4200 год на рік.

В.В. Книш — <http://orcid.org/0000-0003-1289-4462>, С.О. Осадчук — <http://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, С.О. Соловей — <http://orcid.org/0000-0002-1126-5536>, Л.І. Ниркова — <http://orcid.org/0000-0003-3917-0963>, А.О. Рибаків — <http://orcid.org/0000-0001-5533-2393>.

© В.В. Книш, С.О. Осадчук, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, А.О. Рибаків, 2019

Найбільш активно корозійні процеси протікають при наявності фазових плівок вологи, що утворюються при зволоженні поверхні металу рідкими опадами або конденсатом. Згідно даних роботи [16] для помірного клімату, характерного центральним областям України, зволоження фазовою плівкою складає 2520 год на рік. При цьому середньорічна температура в даному регіоні становить 11 °С [18]. У нормативних документах [9–14] для моделювання впливу кліматичних факторів на корозію металу рекомендують проводити експонування зразків в умовах підвищеної температури і вологості, соляного туману або циклічного впливу цих факторів. Оскільки присутність хлоридів у навколишньому середовищі та їх вплив на метали більш характерно для морського клімату (прибережної зони України), то при розробці методики проведення прискорених корозійних випробувань враховували лише такі чинники, як підвищена температура і вологість. Вплив цих факторів моделювали в лабораторних умовах у гідростаті Г4 (камері вологи).

Згідно даних роботи [10, 12] для вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей температура у гідростаті повинна підтримуватися на рівні 40 °С, щоб не змінювати механізм корозійних процесів. При цьому вологість повітря (при відсутності примусової циркуляції повітря) складає близько 100 %, що забезпечує утворення фазових плівок вологи, які ініціюють протікання корозійних процесів протягом всього часу експонування.

Відомо, що при зміні температури від початкової до підвищеної швидкість реакції, в тому числі і швидкість корозії, зростає за законом Вант-Гоффа [19]:

$$V_{t_2} = V_{t_1} \gamma^{(t_2 - t_1)/10}, \quad (1)$$

де V_{t_2} — швидкість реакції при підвищеній температурі під час проведення лабораторних випробувань t_2 (у нашому випадку $t_2 = 40$ °С, згідно [10, 12]; V_{t_1} — швидкість реакції при температурі t_1 . За температуру t_1 брали середньорічну температуру в центральних областях України, тобто 11 °С [18]; γ — температурний коефіцієнт реакції.

Враховуючи рекомендоване значення температурного коефіцієнта $\gamma = 3$, прискорення корозійного процесу в умовах підвищеної температури і вологості відповідно до (1) складе:

$$\gamma^{\frac{t_1 - t_2}{10}} = 3^{\frac{40 - 11}{10}} = 3^{2,9} \approx 24,2. \quad (2)$$

Таким чином, в гідростаті Г4 при підвищеній температурі 40 °С і відносній вологості близько 100 % корозійні процеси на поверхні металу можна прискорити в 24,2 рази. З огляду на те, що

впродовж одного року фазова плівка вологи на поверхні металу спостерігається протягом 2520 год [16], то рік експлуатації конструкції буде еквівалентний експонуванню зразків у гідростаті протягом $2520/24,2 = 104$ ч.

У експлуатованих зварних металоконструкціях корозійні пошкодження елементів виявляють, як правило, при проведенні планових обстежень. При моделюванні корозійних пошкоджень в зварних з'єднаннях за прискореною методикою доцільно орієнтуватися на максимальну періодичність між обстеженнями таких конструкцій. Наприклад, для прогонових будов мостів періодичність між обстеженнями становить від 5 [20] до 10 років [21]. Враховуючи, що після обстеження таких конструкцій і виявлення корозійних пошкоджень до початку ремонтно-відновлювальних робіт пройде ще 1...2 роки, то доцільно на зразках зварних з'єднань змодельовати корозійні пошкодження, які можуть утворитися на поверхні зварних елементів конструкції після її експлуатації протягом близько 12 років.

Таким чином, характерні корозійні пошкодження зварних конструкцій після 12 років експлуатації в умовах впливу найбільш вагомих кліматичних факторів (температури і вологості) помірного клімату центральних областей України можна отримати проведенням прискорених корозійних випробувань у гідростаті Г4 при підвищеній температурі 40 °С і вологості повітря близько 100 % протягом 1200 год.

Матеріал і методика досліджень на втому. Експериментальні дослідження проводили на зразках стикових і таврових зварних з'єднань низьколегованої сталі 15ХСНД ($\sigma_T = 400$ МПа, $\sigma_B = 565$ МПа), яка широко застосовується для виготовлення елементів металоконструкцій тривалої експлуатації (наприклад, в прогонових будовах залізничних і автомобільних мостів), має підвищену міцність, добре зварюється, стійка в атмосферних умовах і працездатна в діапазоні температур від -70 °С до +45 °С.

Заготовки під зразки зварних з'єднань вирізали з гарячекатаного листового прокату товщиною 12 мм 12 категорії в напрямку прокату. Розмір заготовок під стикові з'єднання становив 600×180 мм, а під таврові з'єднання 350×70 мм. Стикові зварні з'єднання отримували двостороннім однодуговим автоматичним зварюванням пластин без оброблення крайок (зазор по стику 0...1,0 мм) під флюсом ОР 192 (фірми «Oerlikon») дротом Св-08ГІНМА діаметром 4 мм. Зварювання проводили на зворотній полярності від електричного випрямляча ВСЖ-1600. Режим зварювання: першого шва: $U = 55$ В, $I = 650...700$ А, $v = 26,7$ м/ч; другого (з

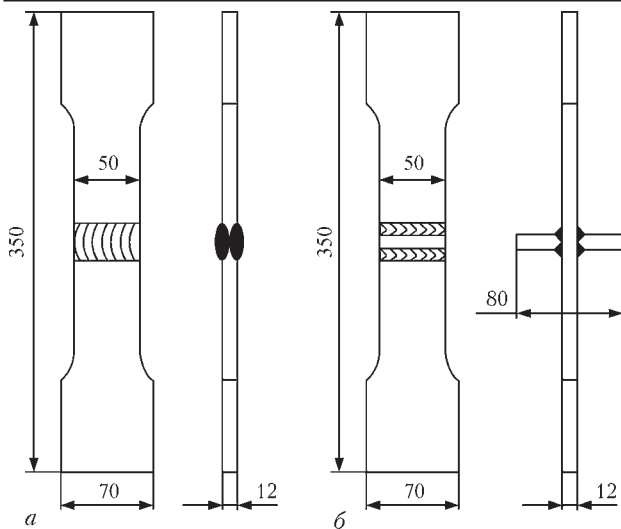


Рис. 1. Зразки стикових (а) і таврових (б) зварних з'єднань

протилежної сторони): $U = 57$ В, $I = 760 \dots 780$ А, $v = 26,7$ м/ч. Другий шов виконували після повного охолодження першого. З кожної зварної пластини розміром 600×360 мм виготовляли по 8 зразків розміром 360×70 мм. Таврові зварні з'єднання отримували шляхом приварки ручним дуговим зварюванням електродами марки УОНІ 13/55 поперечних ребер жорсткості (також зі сталі 15ХСНД) з двох сторін пластини кутовими швами. Корінь (перший шов) виконували електродами діаметром 3 мм, другий шов формували електродами діаметром 4 мм. Форма і геометричні розміри зразків стикових і таврових зварних з'єднань наведені на рис. 1. Товщина зразка обумовлена широкою застосуванням в інженерних зварних металоконструкціях прокату товщиною 12 мм, а ширину робочої частини 50 мм вибирали виходячи з потужності випробувального устаткування.

Розроблена вище методика проведення прискорених корозійних випробувань дозволяє моделювати вплив помірного клімату протягом 12 років на стан поверхні зварних конструкцій. Таким чином, необхідно було також врахувати накопичені втомні пошкодження за впливу змінного циклічного навантаження після 12 років експлуатації. Брали до уваги наступне. Проектний термін служби більшості зварних конструкцій інженерного призначення становить $50 \dots 100$ років. Виходячи з гіпотези лінійного накопичення втомних пошкоджень за 12 років експлуатації зварні з'єднання повинні напрацювати $12 \dots 25$ % своєї довговічності до руйнування, яку можна визначити з кривих втоми даних з'єднань. Криві втоми досліджуваних зварних з'єднань сталі 15ХСНД були встановлені раніше на базі випробувань 2 млн циклів [22]. При цьому границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень для стикових і таврових зварних з'єднань склали, відповідно 187

і 180 МПа. Проте, накопичення втомних пошкоджень в зварних з'єднаннях доцільно проводити при нижчих рівнях прикладених максимальних напружень, які більш наближені до робочих. Згідно з рекомендаціями Міжнародного інституту зварювання [23] криві втоми зварних елементів конструкцій мають незмінний кут нахилу в діапазоні $10^5 \dots 10^7$ циклів, що дає можливість продовжити отриману в роботі [22] криву втоми з $2 \cdot 10^6$ до 10^7 циклів. Необхідний рівень накопичених втомних пошкоджень $12 \dots 25$ % отримували напрацюванням зварними з'єднаннями в початковому стані 2 млн циклів при максимальних значеннях прикладених напружень циклу 150 МПа (на $30 \dots 37$ МПа нижче експериментально встановлених границь обмеженої витривалості досліджуваних з'єднань).

Таким чином, для моделювання накопичених втомних і корозійних пошкоджень, характерних зварним з'єднанням після 12 років експлуатації металоконструкції, всі зразки попередньо піддавали дії $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень на випробувальній машині ЦДМ 10-пу при віднульовому циклі навантаження з максимальними прикладеними напруженнями 150 МПа, а потім відповідно до розробленої методики їх експонували в гідростаті Г4 при температурі 40 °С і відносній вологості повітря 100 % протягом 1200 год. Після корозійних випробувань одну частину зразків залишали незміцненими, а другу зміцнювали технологією ВМП.

Зміцнення зварних з'єднань технологією ВМП виконували обладнанням USTREAT-1.0, в якому ручний компактний ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем з'єднаний з ультразвуковим генератором вихідною потужністю 500 Вт. При обробці зварних з'єднань технологією ВМП поверхневому пластичному деформуванню піддавали вузьку зону переходу металу шва на зону термічного впливу (по лінії сплавлення). У якості пристрою для зміцнення використовували однорядну чотирьохбойкову насадку з діаметром бойків 3 мм. Зміцнення проводили без попереднього очищення поверхні від продуктів корозії.

Для випробувань на втому було підготовлено чотири серії зразків:

- зразки стикових і таврових зварних з'єднань після напрацювання 2 млн циклів і наступних корозійних випробувань, відповідно зразки першої та другої серій;

- зразки стикових і таврових зварних з'єднань після напрацювання 2 млн циклів, наступних корозійних випробувань і зміцнення технологією ВМП, відповідно зразки третьої і четвертої серій.

Експериментальні дослідження опору втоми всіх чотирьох серій зразків проводили на випро-

бувальній машині УРС-20 при змінному розтягуванні з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ і частотою 5 Гц при регулярному навантаженні. За критерій завершення випробувань приймали повне руйнування зразків або перевищення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень.

Результати досліджень. Після випробувань у гідростаті зразки зварних з'єднань були вкриті нерівномірним шаром продуктів корозії коричневого кольору з вкрапленнями продуктів корозії чорного кольору. Після корозійних випробувань очистку зразків від продуктів корозії не проводили. В результаті зміцнення технологією ВМП по лінії переходу металу шва на основний метал формувалася характерна канавка без продуктів корозії



Рис. 2. Зовнішній вигляд зони шва таврового зварного з'єднання сталі 15ХСНД після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів, корозійних випробувань у гідростаті протягом 1200 год і зміцнення технологією ВМП

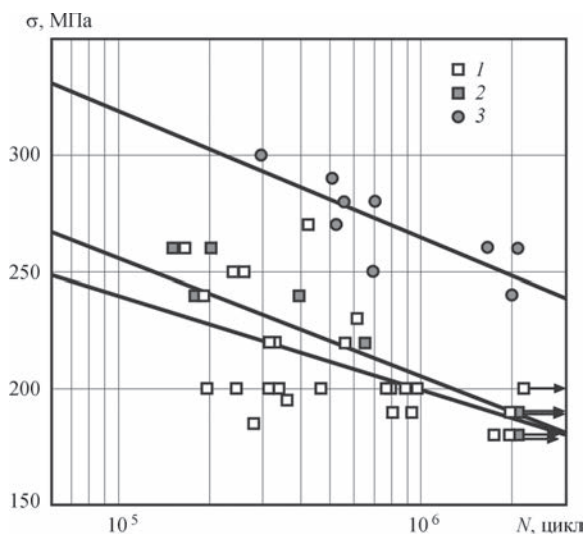


Рис. 3. Криві втоми стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД: 1 — у вихідному стані [22]; 2 — після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів при максимальних напруженнях 150 МПа і корозійних випробувань протягом 1200 год (перша серія); 3 — після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів при максимальних напруженнях 150 МПа, корозійних випробувань протягом 1200 год і подальшого зміцнення технологією ВМП (третья серія)

(рис. 2). Результати втомних випробувань зразків стикового і таврового зварних з'єднань сталі 15ХСНД представлені на рис. 3 і 4, відповідно. Там же наведені результати випробувань зварних з'єднань у вихідному стані (без впливу корозійного середовища), отримані раніше в роботі [22].

Експериментально встановлено, що характеристики опору втомі стикових зварних з'єднань після циклічного навантаження ($2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень) і подальшого експонування в умовах підвищеної температури і вологості повітря протягом 1200 год (перша серія) знаходяться на рівні зварних з'єднань у вихідному стані, випробуваних на повітрі (рис. 3, криві 1, 2). Руйнування всіх зразків першої серії відбулося по лінії переходу металу шва на основний метал. Зміцнення технологією ВМП (третья серія) підвищує границі обмеженої витривалості таких з'єднань на базі $2 \cdot 10^6$ циклів на 33 % (з 187 до 248 МПа) у порівнянні з з'єднаннями як у вихідному стані, так і з заданим рівнем накопичених втомних і корозійних пошкоджень без зміцнення (рис. 3). При цьому циклічна довговічність зміцнених зварних з'єднань збільшується в 10 разів. Руйнування всіх зразків третьої серії відбувалося по основному металу віддалік від лінії сплавлення (рис. 5, а).

Характеристики опору втомі таврових зварних з'єднань після циклічного навантаження і корозійних випробувань протягом 1200 год (друга серія) знизилися на 25 % (з 180 до 135 МПа) у порівнянні з з'єднаннями у вихідному стані, випробуваними на повітрі (рис. 3, криві 1, 2). Руй-

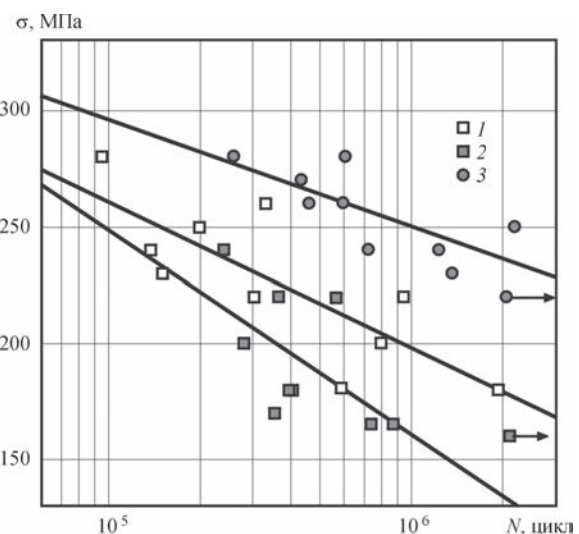


Рис. 4. Криві втоми таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД: 1 — у вихідному стані [22]; 2 — після напрацювання циклів при максимальних напруженнях 150 МПа і корозійних випробувань протягом 1200 год (друга серія); 3 — після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів при максимальних напруженнях 150 МПа, корозійних випробувань протягом 1200 год і подальшого зміцнення технологією ВМП (четверта серія)

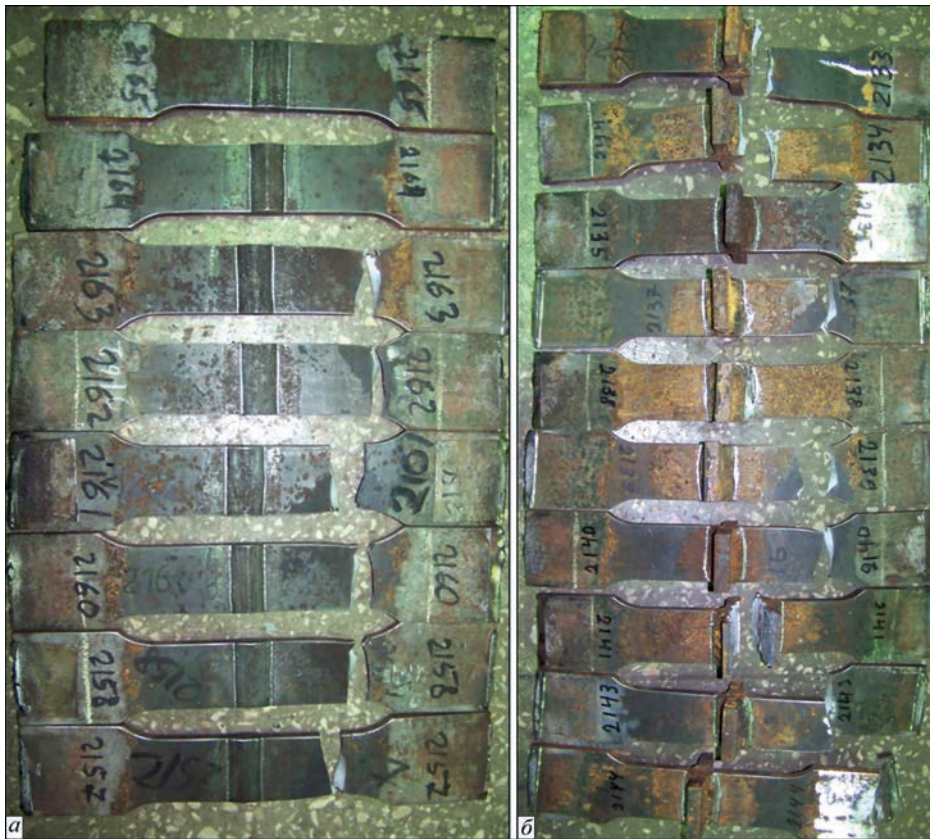


Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків третьої (а) та четвертої (б) серій після випробувань на втому

нування всіх зразків другої серії відбулося по лінії переходу металу шва на основний метал. Зміцнення технологією ВМП (четверта серія) істотно підвищує характеристики опору втомі: границя обмеженої витривалості таких з'єднань на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищується на 31 % (з 180 до 236 МПа) у порівнянні з зразками у вихідному стані, а циклічна довговічність збільшується у 8 разів. У порівнянні з зразками другої серії (з заданим рівнем накопичених втомних і корозійних пошкоджень, без зміцнення) границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів зразків четвертої серії підвищується на 75 % (з 135 до 236 МПа), а циклічна довговічність збільшується в 10 разів (рис. 4). Руйнування зразків четвертої серії відбувалося як по лінії сплавлення, так і по основному металу віддалік від зварного шва (рис. 5, б). Один зразок зруйнувався від неповного проплавлення кореня шва по ребру, але його циклічна довговічність перебувала в межах розкиду даних для бездефектних зварних з'єднань.

Отже, експериментально отримані результати свідчать про високу ефективність застосування технології ВМП для підвищення характеристик опору втомі стикових і таврових зварних з'єднань металоконструкцій після їх тривалої експлуатації в умовах впливу змінного навантаження і атмосфери помірного клімату.

Висновки

1. Розроблено методику прискорених корозійних випробувань зварних з'єднань для моделювання тривалого впливу на них найбільш вагомих кліматичних факторів (температури і відносної вологості) помірного клімату центральних областей України. Обґрунтовано доцільність моделювання корозійних пошкоджень, які утворюються на поверхні елементів зварних конструкцій після 12 років експлуатації. Такі корозійні пошкодження зварних з'єднань запропоновано отримувати проведенням прискорених корозійних випробувань у гідростаті Г4 при підвищеній температурі 40°C і відносній вологості повітря 100 % протягом 1200 год.

2. Встановлено, що зміцнення технологією ВМП стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД після попереднього напрацювання 2 млн циклів при рівнях максимальних напружень 150 МПа і експонування в умовах підвищеної температури і вологості повітря протягом 1200 год призводить до збільшення циклічної довговічності в 10 разів і підвищення границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів на 33 % (з 187 до 248 МПа).

3. Показана висока ефективність зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД із заданим рівнем накопичених втомних і корозійних пошкоджень: границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищується на 75 % (з 135 до 236 МПа), а циклічна довговічність збільшується в 10 разів.

Список літератури

1. Ковтуненко В.А., Синеок А.Г., Герасименко А.М., Задорожный В.А. (2005) Характерные повреждения сварных металлических конструкций мостов. *Автоматическая сварка*, **10**, 29–34.
2. Ушаков И.И., Мищенко В.Я., Ушаков С.И. (2013) *Коррозионные повреждения стальных конструкций и основы диагностики* [Электронный ресурс]. Уч. пособие. Москва, АСВ.
3. Toyoda M. (1995) How steel structures fared in Japan's great earthquake. *Welding Journal*, **74**, 31–42.
4. Takanori Deluchi, Masashi Mouri, Junya Hara et al. (2012) Fatigue strength improvement for ship structures by ultrasonic peening. *Journal of Marine Science and Technology*, **17**, **3**, 360–369.
5. Fisher J.W., Statnikov E., Tehini L. (2002) Fatigue strength improvement of bridge girders by ultrasonic impact treatment (UIT). *Welding in the World*, **46**, **9-10**, 34–40.
6. Fikri Bashar Yalchiner, Zuheir Barsoum (2017) Life extension of welded structures using HFMI Techniques – potential application to offshore structures. *Procedia Structural Integrity*, **5**, 377–384.
7. Kirkhope K.J., Bell R., Caron L. et al. (1999) Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2: application to ship structures. *Marine Structures*, **12**, **7-8**, 477–496.
8. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Lugovskoy A. et al. (2007) Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening. *Welding in the World*, **51**, **7-8**, 47–53.
9. (1989) *ГОСТ 9.911-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сталь атмосферостойкая. Метод ускоренных коррозионных испытаний*.
10. (1985) *ГОСТ 9.308-85 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний*.
11. (2006) *ISO 9227-2006 Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests*.
12. (2015) *ДСТУ ISO 6270-2:2015 Фарби та лаки. Визначення вологостійкості. Ч. 2. Випробування зразків в атмосфері конденсації води*.
13. (2015) *ДСТУ ISO 12944-6:2015 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Ч. 6. Лабораторне виконання випробувань*.
14. (2002) *ГОСТ Р 51910-2002 Методика исследования и проверки ускоренными методами влияния внешних воздействующих факторов на долговечность и сохранность технических изделий. Разработка и построение*.
15. (2015) *ДСТУ ISO 12944-1:2015 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 1: General introduction*.
16. (1974) *ГОСТ 9.039-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Коррозионная агрессивность атмосферы*.
17. (2015) *ISO 12944-2:2015 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2: Classification of environments*.
18. (1974) *ГОСТ 9.040-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях*.
19. Семиохин И.А. (2001) *Физическая химия*. Учебник. Москва, МГУ.
20. (2002) *ДБН В.2.3-6-2002 Сооружения транспорта. Мосты и трубы. Обследование и испытание*.

21. (2008) *ОДМ 218.4.001-2008* Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах.
22. Кныш В.В., Соловей С.А., Кирьян В.И., Булаш В.Н. (2018) Повышение сопротивления коррозионной усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой. *Проблемы прочности*, **3**, 91–97.
23. Hobbacher A. (2008) Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. *International Institute of Welding*.

References

1. Kovtunencko, V.A., Sineok, A.G., Gerasimenko, A.M., Zadorozhny, V.A. (2005) Typical damages of welded metal structures of bridges. *The Paton Welding J.*, **10**, 27–32.
2. Ushakov, I.I., Mishchenko, V.Ya., Ushakov, S.I. (2013) *Corrosion damages of steel structures and fundamentals of diagnostics: Manual*. Moscow, ASB [in Russian].
3. Toyoda, M. (1995) How steel structures fared in Japan's great earthquake. *Welding J.*, **74**, 31–42.
4. Takanori Deluchi, Masashi Mouri, Junya Hara et al. (2012) Fatigue strength improvement for ship structures by ultrasonic peening. *J. of Marine Sci. and Technol.*, **17**(**3**), 360–369.
5. Fisher, J.W., Statnikov, E., Tehini, L. (2002) Fatigue strength improvement of bridge girders by ultrasonic impact treatment (UIT). *Welding in the World*, **46**(**9-10**), 34–40.
6. Fikri Bashar Yalchiner, Zuheir Barsoum (2017) Life extension of welded structures using HFMI techniques – potential application to offshore structures. *Procedia Structural Integrity*, **5**, 377–384.
7. Kirkhope, K.J., Bell, R., Caron, L. et al. (1999) Weld detail fatigue life improvement techniques. Pt 2: Application to ship structures. *Marine Structures*, **12**(**7-8**), 477–496.
8. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Lugovskoy, A. et al. (2007) Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening. *Welding in the World*, **51**(**7-8**), 47–53.
9. (1989) *GOST 9.911-89: Unified system of corrosion and ageing protection. Weather-resistant steel. Accelerated corrosion test method* [in Russian].
10. (1985) *GOST 9.308-85: Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Methods of accelerated corrosion tests* [in Russian].
11. (2006) *ISO 9227-2006: Corrosion tests in artificial atmospheres. Salt spray tests*.
12. (2015) *DSTU ISO 6270-2:2015: Paints and varnishes. Determination of resistance to humidity. Pt 2: Procedure for exposing test specimens in condensation-water atmospheres* [in Ukrainian].
13. (2015) *DSTU ISO 12944-6:2015: Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Pt 6: Laboratory performance test methods* [in Ukrainian].
14. (2002) *GOST R 51910-2002: Research and testing strategy by accelerated methods of environmental conditions influence for industrial products longevity and storage ability. Development and design* [in Russian].
15. (2015) *DSTU ISO 12944-1: 2015: Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Pt 1: General introduction*.
16. (1974) *GOST 9.039-74: Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Corrosion aggressiveness of atmosphere* [in Russian].

17. (2015) *ISO 12944-2:2015*: Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Pt 2: Classification of environments.
18. (1974) *GOST 9.040-74*: Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Calculated and experimental method for accelerated test of corrosion losses in atmospheric conditions [in Russian].
19. Semiokhin, I.A. (2001) *Physical chemistry*: Manual. Moscow, MGU [in Russian].
20. (2002) *DBN V.2.3-6-2002*: Transport structures. Bridges and pipes. Survey and test [in Russian].
21. (2008) *ODM 218.4.001-2008*: Guidelines on organization of survey and test of bridge structures on car roads [in Russian].
22. Knysh, V.V., Solovej, S.A., Kirian, V.I., Bulash, V.N. (2018) Improvement of fatigue corrosion resistance of welded joints by high-frequency mechanical peening. *Problemy Prochnosti*, **3**, 91-97 [in Russian].
23. Hobbacher, A. (2008) *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Doc.IIW-1823-07, ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07.

PROCEDURE OF ACCELERATED CORROSION TESTING FOR MODELLING THE LONG-TERM EFFECT OF MODERATE CLIMATE ATMOSPHERE ON WELDED JOINTS

V.V. Knysh, S.O. Osadchuk, S.O. Solovej, L.I. Nyrkova, A.O. Rybakov

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

We propose a procedure of accelerated corrosion testing of welded joints for modeling the long-term effect of the most significant climatic factors of moderate climate atmosphere (temperature and relative humidity) on them. Duration of accelerated testing of welded joints in the humidity chamber to obtain corrosion damage, which is characteristic for welded joints of metal structures after approximately 12 years of operation, is substantiated. Fatigue testing of butt and tee welded joints of 15KhSND steel after preliminary exposure to 2 mln. cycles at maximum stresses of 150 MPa, corrosion testing under the conditions of higher temperature and relative humidity without strengthening and with further strengthening by the technology of high-frequency mechanical peening, were performed. It is found that strengthening by the technology of high-frequency mechanical peening improves 10 times the cyclic fatigue life of butt and tee welded joints with accumulated fatigue and corrosion damage. 23 Ref., 5 Fig.

Keywords: welded joint, corrosive environment, fatigue, accelerated corrosion testing, high-frequency mechanical peening, improvement of cyclic fatigue life

Поступила в редакцію 27.09.2019

X МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»

**Україна, Одеса, отель «Аркадія»
14 – 18 вересня 2020 р.**



**Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»**

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 червня 2020 р.
До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць дев'яти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті:
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Контрольні дати

Подача заявок на участь та тез доповідей до 19.06.2020 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення
і підтвердження участі до 17.07.2020 р.
Оплата реєстраційного внеску до 15.09.2020 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна;
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2020>

MULTIPURPOSE ELECTRON BEAM WELDING MACHINE

V. Nesterenkov, K. Khrypko, V. Lukyanov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The Electric Welding Institute named after E. O. Paton has been specializing for many decades in electron-beam welding (EBW) techniques for many modern structural alloys, including the development of EBW equipment and related production methods. The past two decades, the Electric Welding Institute designed and manufactured a lot of units, used for EBW of various products. All these units can be roughly divided into several types according to the welding chamber volume: «small», «medium», «large» and «extra large». 6 Ref., 3 Fig.

Keywords: electron beam welding machine, control system, graphical user interface

The Electric Welding Institute designed and manufactured the KL-115 (Fig. 1) multipurpose electron beam welding machine. The machine has an internal welding electron beam gun located on the cantilever mechanism with 5 degrees of freedom, namely gun motion along the three Cartesian coordinate axes X , Y , Z and its tilting in two cross planes [1]. To rotate all kinds of welded rotation figures, the machine is equipped with 3 different welding positioners: with a horizontal axis of workpiece rotation (equipped with a corresponding tailstock to support long parts), with a vertical axis of rotation and with an inclinable ($0...90^\circ$) axis of rotation. Thus, the machine has 7 movable mechanical axes controlled by the CNC (with the ability to control up to 4 axes at the same

time), which, together with a sufficiently large volume of the welding chamber, provides very wide technological capabilities of the welding machine [2, 3]. At the same time, although it can be used for welding both linear and curved seams of workpieces of any suitable shape and size for many industries, but, given the configuration, the emphasis here is primarily on the possibility of welding rotation figures, namely various rather big elements of aircraft engines and similar products.

The machine has an up-to-date control system (Fig. 2) on the base of a complete industrial system Sinumerik 840Dsl of the company Siemens [4]. Part of equipment, which is exerting influence on the welding process, is under continual program control.

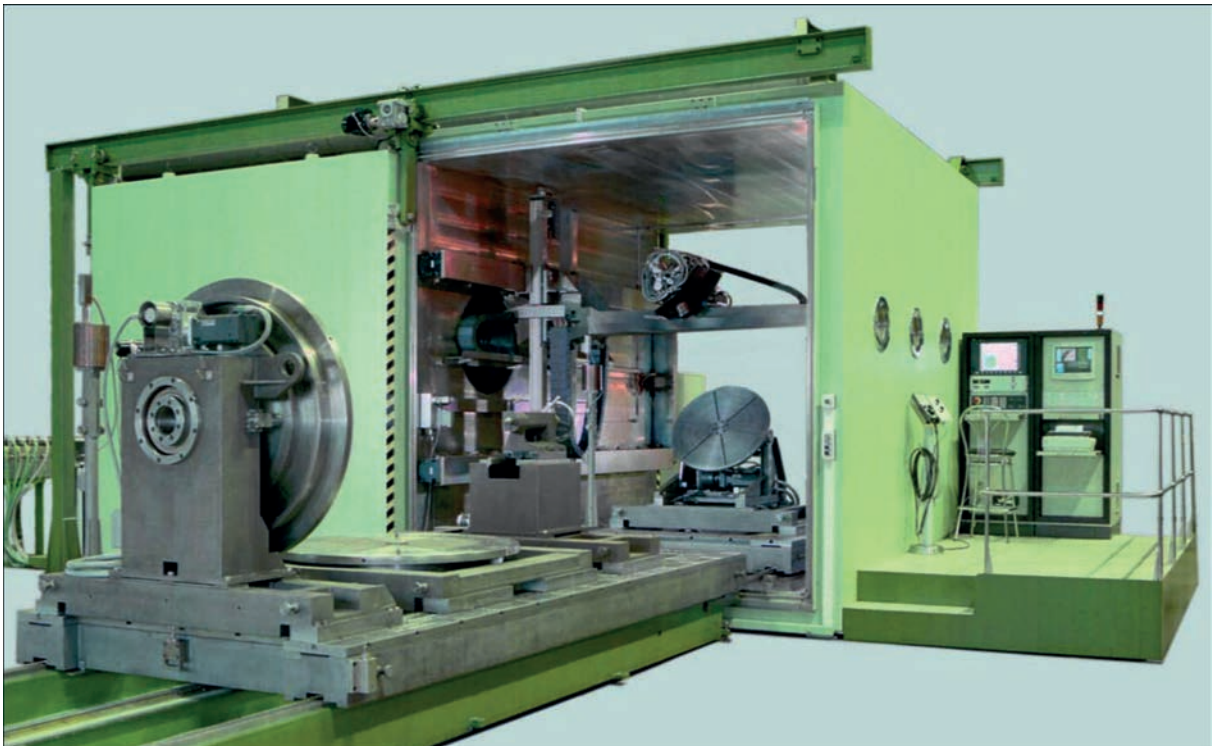


Fig. 1. KL-115 electron beam welding machine

© V. Nesterenkov, K. Khrypko, V. Lukyanov, 2019

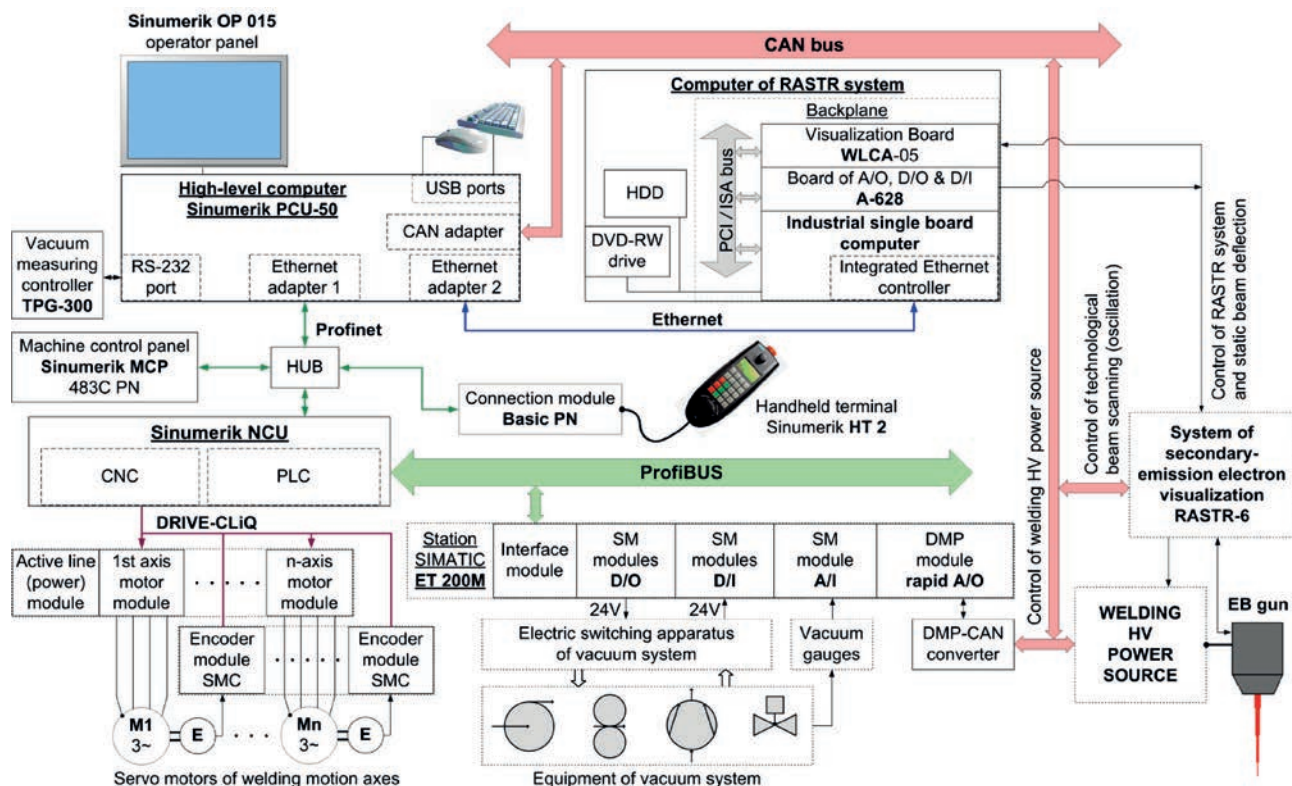


Fig. 2. KL-115 machine control system diagram

The concept of high-level software control, in which the user interacts with the equipment exclusively via the Windows-oriented graphical user interface (GUI), is used. The operation with GUI is made by using conventional standard tools: a keyboard and a mouse. The interface is intuitively conceivable (easy-to-understand) and doesn't require any specific skill. Each of the machine's subsystems is served by the appropriate window-based graphic tools with input data validation and safety locks to ensure the user and equipment protection.

Hierarchically, the control system is divided into two hardware and software levels, namely upper and lower. The upper level includes all means of communication with the user, including the GUI [5], means of creation and storage of specific welding programs (including collection of several welding subprograms with shared trajectory into one user program, for instance, tack run, welding run and cosmetic run), collection and storage of diagnostic data (including welding parameters), administration, etc. The lower level is engaged in the direct execution of all procedures under the instruction from the upper level.

At that the upper-level control program operates on the industrial computer Sinumerik PCU 50. The upper level interacts directly with the lower level elements, namely: the machine control panel (MCP), the main module NCU and connection module Basic PN, to which the mobile handheld terminal HT 2,

used for the gun or weldment manual motion, is connected

Welding motion is under the CNC complete control both in the manual movement mode and at automatic welding mode. In the latter case, the text script of the prepared welding program is transmitted from the upper level to the NCU, where CNC makes a full calculation of the trajectory, proper interpolations, speeds and accelerations for each of the axes involved. CNC provides complete synchronization of all axes, both mechanical and virtual. As virtual axes, the channels of welding and focusing currents, as well as the channel of electron beam technological oscillation, are used [6]. At that the control assignments of these axes are

taken from the DMP module of rapid analog outputs of the station ET 200M and converted into the CAN bus protocol (from which the high-voltage welding power supply is controlled).

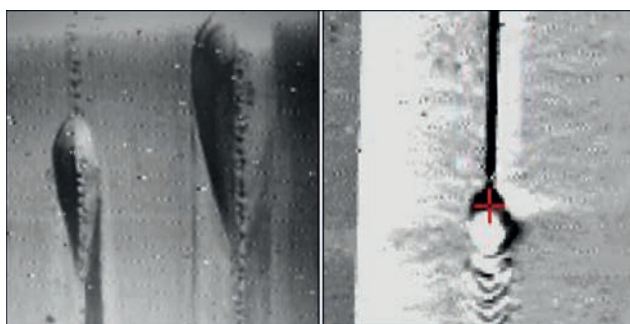


Fig. 3. The secondary-emission image of welded surface

Also the upper level interacts with the additional lower level element — the computer of the «RASTR-6» subsystem, which operates on the principles of a scanning electron microscope and makes it possible in real time to observe on upper-level program GUI the secondary-emission image of welded surface (Fig. 3) before/after and during the welding process, precisely manually to aim the electron beam on any butt to be welded, as well as gives the data for operation of special automated algorithms of the weld butt «search» at both automatic teach-in (creation) of a new complicated curvilinear trajectory and correction of an existing trajectory immediately before welding of any serial product.

The PLC (Programmable Logic Controller) of NCU fulfills safe automatic control of vacuum system using digital and analog inputs/outputs of the station ET 200M.

Main technical parameters of KL-115 machine

Overall machine dimensions (length×width×height), mm	15960·10300·3740
Weight, tons	48
Vacuum chamber internal size (length×width×height), mm	4040·2950·2950
Working pressure in vacuum chamber, torr, not worse than	2.5·10 ⁻⁴
Working pressure in EB gun, torr, not worse than	5·10 ⁻⁵
Pump-down time before working pressure in chamber and EB gun is obtained, minutes, max	25

EB gun movement (with positioning accuracy ± 0.1 mm) stroke along coordinates X, Y and Z, mm	3000, 1800 and 2000
EB gun linear movement speed, mm/s	1.66...33.3
EB gun rotation angle (with accuracy 0,1°) in X-Y plane, degrees	90
EB gun rotation angle (with accuracy 0,1°) in X-Y plane, degrees	± 90
Electron beam gun and power supply: ... 60 kW / 60 (± 0.06 kV) – Metal cathode life-time, hours	40
– Beam deflection angle, degree	$\pm 3,5$
«RASTR-6» resolution upon observation, mm	0.1
Equipped water chiller	Yes
Mains supply (according to German Standards DIN EN 60 204-4.3)	380, 50/60 Hz, 250 kVA

References

1. Nazarenko O.K., Nesterenkov V.M., Neporozhny Yu.V. (2001) Design and electron beam welding of vacuum chambers. *The Paton Welding J.*, **6**, 40-42.
2. LaFlamme G., Mac Williams S., Rugh J., Hendryx R.. (2006) Hybrid EBW Process Joining Heavy-Duty Impellers. *Welding Journal*, **1**, p.44-47.
3. Myers L., LaFlamme G. (2000) Electron beam braze welding of compressor impellers. *The Paton Welding J.*, **8**, 53–57.
4. Paton B.E., Nazarenko O.K., Nesterenkov V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, **5**, 2–5.
5. Nesterenkov V.M., Khripko K.S. (2017) Recent achievements of E.O. Paton Electric Welding Institute in development of equipment for electron beam welding. *Zvaroc professional*. **2**, 9–13.
6. Nazarenko O.K., Nesterenkov V.M., Ilyushenko R.V. (2005) Weldability of aircraft aluminium alloys of great thickness in EBW. *The Paton Welding Journal*, **8**, 25-31.

УНІВЕРСАЛЬНА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ЗВАРЮВАЛЬНА УСТАНОВКА

В. Нестеренков, К. Хрипко, В. Лук'янов

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

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона протягом багатьох десятиліть спеціалізується на розробці технологій електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) сучасних конструкційних сплавів, включаючи розробку обладнання ЕПЗ і пов'язаних з ним методів виробництва. За останні два десятиліття ІЕЗ розробив і виготовив безліч установок, використовуваних для ЕПЗ різних виробів. Всі ці установки можна умовно розділити на кілька типів залежно від обсягу зварювальної камери: «малі», «середні», «великі» і «дуже великі». Бібліогр. 6, рис. 3.

Ключові слова: електронно-променева зварювальна машина, система управління, графічний інтерфейс користувача

YOUNG PROFESSIONALS INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES

19-22 May, 2020, Kyiv, Ukraine
<https://ypic2020.com>

Щорічна конференція-виставка
«НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2020»
Травень 2020 р., Київ, «Асоціація «ОКО»
<http://www.ndt.com.ua>

Міжнародна конференція
«ТИТАН 2020: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ»

1–3 червня 2020 р., Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
тел.: 38044 200-82-77, journal@paton.kiev.ua, <http://pwi-scientists.com/rus/titan2020>

ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ



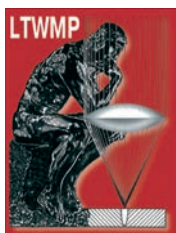
І.П. Лентюгов (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України) захистив 28 жовтня 2019 р. кандидатську дисертацію на тему «Порошкові дроти для наплавлення з шихтою з лігатури, отриманої електрошлаковим переплавом відходів абразивної обробки швидкорізальних сталей».

Робота присвячена розробці порошкових дротів для зносостійкого наплавлення, в шихті яких використовуються лігатури, отримані електрошлаковим переплавом металовмісних відходів, що утворюються при абразивній обробці високолегованих швидкорізальних сталей. Вперше запропоновано технологію, яка дозволяє переробляти відходи абразивної обробки швидкорізальних інструментальних сталей у високолеговані лігатури для виробництва порошкових дротів для наплавлення. Технологія переробки відходів включає вхідний контроль їх хімічного складу, прожарювання, магнітну сепарацію, ЕШП металеві складові відходів, розмелювання отриманої лігатури, контроль хімічного складу лігатури. Експериментально встановлено, що для підтримки стійкого процесу ЕШП відходів необхідно, щоб питома потужність процесу була не менше 150 Вт/см^2 , яка забезпечує швидкість плавлення частинок на рівні $2,0 \dots 2,5 \text{ кг/хв}$ ($120 \dots 160 \text{ кг/год}$). При цьому на розплавлення відходів витрачається близько 30 % від загальних витрат тепла, що забезпечує досить високий ККД процесу ЕШП. Показано, що при використанні порошку лігатури в якості основного компонента шихти порошкового дроту, забезпечується отримання наплавленого металу, відповідного за хімічним складом типу Fe_4 по ДСТУ EN 14700:2008. За системою легування наплавлений метал цього типу можна віднести до хромовольфрамових, хромомолібденових напівтеплостійких сталей. Порошкові дроти цього типу використовуються для наплавлення інструментів гарячого і холодного деформування металів. Результати, отримані в роботі, підтверджені дослідно-промисловою перевіркою, яка проведена на ТОВ «ТКШЗ» при наплавленні штампів гарячого штампування розробленим порошковим дротом ПП-Нп-120ВЗХМФ. Економічний ефект від безпосереднього застосування розробленого порошкового дроту ПП-Нп-120ВЗХМФ для наплавлення штампів на підприємстві ТОВ «ТКШЗ» складе близько 200 тис. грн. Певний ефект забезпечить також повернення в промислове виробництво металовмісних відходів абразивної обробки інструментальних швидкорізальних сталей.



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України М.В. Юрженко (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) захистив 28 жовтня 2019 р. докторську дисертацію на тему «Наукові основи та технології зварювання інженерних і високотехнологічних пластмас».

Робота присвячена встановленню загальних закономірностей впливу на структуру та властивості зварних з'єднань пластмас параметрів та режимів зварювання, вивченню особливостей термомеханічних процесів, що реалізуються в зоні зварювання пластмас за допомогою методів математичного моделювання та порівняльних експериментальних досліджень, розробка на основі нових узагальнених знань ефективних технологій та обладнання. Досліджено структуру і властивості зварних з'єднань модельних полімерних матеріалів — технічних марок поліетилену, визначено зв'язок між ними, а також параметрами і умовами зварювання. Виявлено, що при зварюванні пластмас в їх зварному з'єднанні формується більш упорядкована структура із специфічними властивостями та підвищеними експлуатаційними характеристиками, які є відмінними від структури, властивостей та характеристик основного полімерного матеріалу, що зварюється, за рахунок плавлення його кристалічної фази, орієнтації його макромолекул зі зміною їх конформацій, що супроводжується їх взаємодією та формуванням змішаної структури їх сегментів і зародків спільних кристалітів, та подальшою її частковою кристалізацією під дії теплового та силового полів. Встановлено можливість керованого регулювання структури та властивостей зварних з'єднань варіюванням як параметрів процесів зварювання, так і направленою дією зовнішніх факторів, наприклад, постійного магнітного поля. На основі узагальнених результатів теоретичних і експериментальних досліджень, в тому числі математичного моделювання, розроблено технології та відповідне обладнання для зварювання труб і листів із інженерних та високотехнологічних пластмас, проведено їх апробацію та впровадження.



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ»

В период с 9 по 13 сентября 2019 г. в Одессе на базе отеля «Аркадия» состоялась IX Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» (LTWMP-2019), организованная Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» и Международной Ассоциацией «Сварка».

В работе конференции приняло участие более 60 ученых и специалистов из Украины, Словакии, Германии, Беларуси и Китая. Конференция была организована в виде пленарных и стендовых сессий, рабочие языки конференции русский, украинский и английский (был обеспечен синхронный перевод докладов). Во время пленарных и стендовых сессий было заслушано 37 докладов.

Открыл конференцию Председатель программного комитета конференции, заместитель директора ИЭС им. Е.О. Патона академик И.В. Кривцун. В своем выступлении он отметил, что для участия в конференции заявлены доклады по лазерной тематике, гибридным и 3D технологиям, а также доклады по электронно-лучевым технологиям в сварке и в специальной электрометаллургии. Академик И.В. Кривцун также отметил роль парогазового канала в лучевых технологиях при формировании сварных соединений и роль синергетического эффекта в гибридных технологиях.

Отметим некоторые из докладов, которые дают представление о затрагиваемых на конференции проблемах:

– «Особенности формирования металлической структуры изделий из титановых сплавов, полу-

ченных 3D печатью с применением профильного электронного луча по технологии xBeam 3D Metal Printing», *Ковальчук Д.В.*, ЧАО «НВО Червона Хвиля», Киев;

– «Contribution to the welding of hot-rolled aluminum-lithium alloys by electron beam», *Drimal Daniel*, PRVA ZVARACSKA a. s., Bratislava, Slovak Republic;

– «Специализированное технологическое электронно-лучевое оборудование для реализации аддитивного процесса послойного изготовления изделий из металла с применением порошковых материалов», *Нестеренков В.М.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Электронно-лучевая плавка жаропрочных титановых сплавов системы Ti-Si-Al-Zr-Sn», *Северин А.Ю.*, ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Оптимизация технологических параметров послойного формирования изделий из титанового сплава BT6 с помощью ЭЛС на основе математического моделирования», *Кандава С.М.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Отработка технологических операций лазерной сварки и лазерной наплавки элементов малогабаритных сопловых блоков жидкостных ракетных двигателей», *Шелягин В.Д.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Modelling of Temperature Fields in Electron Beam Sintering», *Semenov O.*, E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv;

– «Электронно-лучевая технология как метод получения теплостойких покрытий системы ZrO_2 - Y_2O_3 с хорошими функциональными характеристиками на различных типах металлических подслоев», *Куренкова В.В.*, ООО «Патон Турбайн Текнолоджи», Киев;

– «Формирование расходуемых электродов из губчатого титана методом электронно-лучевого оплавления», *Пикулин А.Н.*, НПЦ «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Микроструктура сплавов титана BT20, полученных методом послойной электронно-лучевой наплавки с применением отечественных порошковых ма-



Выступление академика И.В. Кривцуна при открытии конференции

териалов», *Матвейчук В.А.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Гибридная лазерно-микроплазменная сварка нержавеющей сталей», *Хаскин В.Ю.*, Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона, Гуанчжоу, КНР;

– «Адаптивное управление процессом лазерной сварки и наплавки деталей сложной формы при обеспечении геометрической точности траекторных перемещений», *Комбаров В.В.*, НПФ «ХА-И-Инжиниринг», Харьков;

– «Закономерности влияния параметров процесса выборочного лазерного плавления (SLM) на формирование единичного слоя из жаропрочного никелиевого сплава INCONEL 718», *Аджамский С.В.*, ООО «Лазерные аддитивные технологии Украины», Днепр;

– «Структура и свойства соединений алюминиевого сплава AA7056 T351, выполненных электронно-лучевой сваркой», *Бердникова Е.Н.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Моделирование напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток паровых турбин из титанового сплава при восстановительном ремонте с применением электронно-лучевой наплавки», *Кандава С.М.*, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев;

– «Дослідження лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів різного функціонального призначення», *Салій С.С.*, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ;

– «ЭЛС и термообработка экономнолегированных титановых сплавов на основе β -фазы», *Белюс В.Ю.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Устранение хампинг-эффекта при лазерно-дуговой сварке сталей повышенной прочно-

сти», *Хаскин В.Ю.*, Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона, Гуанчжоу, КНР;

– «Структура и свойства разнородных титан-алюминиевых сварных соединений, полученных лазерной сваркой», *Сидорец В.Н.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Гибридная система для электронно-лучевого испарения и ионного распыления», *Кузьмичев А.И.*, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»;

– «Электронно-лучевая плавка экономнолегированных сплавов на основе титана», *Березос В.А.*, НПЦ «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Дослідження особливостей процесів формування зварних з'єднань при лазерному зварюванні сталей і сплавів у різних просторових положеннях», *Бернацький А.В.*, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ;

– «Влияние конденсационных многослойных защитных покрытий на циклическую прочность сплава ВТ-6», *Микитчик А.В.*, Международный центр электронно-лучевых технологий ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Микроупрочнение границ наплавленных слоев в изделиях, получаемых методом электронно-лучевой наплавки», *Хохлова Ю.А.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев.

Были также представлены доклады по применению лазеров в медицине, для 3D печати пластмасс и два доклада по применению нелучевых концентрированных источников нагрева:

– «Влияние режимов импульсно-дуговой сварки на термические циклы и геометрические параметры швов и ЗТВ сварных соединений, выполненных высоколегированными сварочными материалами», *Позняков В.Д.*, ИЭС им. Е.О. Патона, Киев;

– «Температура плавления наночастиц металла в плазме», *Драган Г.С.*, НИИ физики Одес-



Участники конференции LTWMP-2019

ского национального университета имени И.И. Мечникова.

Вне программы конференции выступил директор Центра химических технологий Академии инженерных наук *А.П. Мухачов* (г. Каменское) с информацией о направлениях деятельности центра по восстановлению производства в Украине гафния, циркония, ниобия и молибдена в установках электронно-лучевого переплава.

Полишко А.А. (ИЭС им. Е.О. Патона) провела презентацию конференции молодых ученых и специалистов YPIC/WRTYS 2020 «Young Professionals International Conference on Welding and Related Technologies», 19–22 мая 2020, Киев (<https://ypic2020.com>) и пригласила ученых, специалистов и руководителей предприятий к участию в ней в качестве докладчиков, слушателей и спонсоров. В конференции также приняли участие без докладов представители ряда промышленных предприятий Украины из Киева, Днепра, Запорожья, Харькова, Кривого Рога, Каменского, использующие в производственном цикле лазерные и лучевые технологии.

По завершению конференции был проведен Круглый стол «Новые разработки в области 3D лучевых технологий». Во время проведения круглого стола обсуждались актуальные проблемы развития лучевых сварочных технологий применительно к получению трехмерных изделий из различных металлических материалов и были

продемонстрированы готовые изделия, полученные с помощью лазерного 3D прототипирования (ООО «Лазерные аддитивные технологии Украины») и в электронно-лучевых установках (ЧАО «НВО Червона Хвиля», ИЭС им. Е.О. Патона).

К концу 2019 г. будут изданы труды конференции LTWMP-2019. Труды предыдущих восьми конференций LTWMP можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка» или получить в открытом доступе на сайте издательства ИЭС им. Е.О. Патона по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/eng/proceedings/ltwmp>.

Доброжелательная, гостеприимная, творческая обстановка конференции способствовала развитию полезных дискуссий, установлению деловых контактов. Участники конференции выразили единодушное одобрение предложению о проведении следующей, десятой Международной конференции по лучевым технологиям в сварке и обработке материалов (LTWMP-2021) в сентябре 2021 г. в Одессе, Украина.

Организационный комитет конференции LTWMP-2019 выражает благодарность и признательность компаниям Червона Хвиля, Технологии высоких энергий, Китайско-украинскому институту сварки им. Е.О. Патона, Центру «Титан» ИЭС, Центру электронно-лучевой сварки ИЭС и Международному центру электронно-лучевых технологий ИЭС за оказанную помощь в проведении конференции.

А.Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук

ВСЕУКРАИНСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

17–19 сентября 2019 г. в с. Коблево (Николаевская обл.) состоялась Всеукраинская конференция с международным участием «Проблемы сварки и родственных технологий», посвященная 60-летию кафедры сварочного производства Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова.

В конференции приняли участие ведущие и молодые ученые технических университетов, научно-исследовательских институтов и организаций Украины, Беларуси, Китая, а также представители промышленных предприятий. До начала конференции ее организаторами были изданы материалы с тезисами 59 заявленных докладов. Общее число участников составило более 40 человек. География представителей охватывала все регионы страны — от востока (города Мариуполь,

Краматорск) до запада (г. Тернополь) и с севера (г. Чернигов) до юга (г. Херсон).

Всего было заслушано и обсуждено 25 докладов по 5 научным направлениям:

технологии, материалы и оборудование сварки плавлением;
наплавка;
пайка и родственные процессы;
компьютерное моделирование и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сварных и паяных соединений;
сварка в твердом состоянии.

Наибольший интерес участников конференции вызвал обобщающий доклад Квасницкого В.В. (Национальный технический университет «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»), в котором представлены пробле-



мы и результаты разработки припоев для жаропрочных сплавов газовых турбин нового поколения, а также доклады Майстренко А.Л. (Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины) «Сварка алюминиевых криволинейных панелей методом трения с перемешиванием», Шваба С.Л. (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины) «TIG сварка и наплавка титанового сплава BT22 с использованием управляющего магнитного поля и присадочной порошковой проволоки», Костина А.М. (Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова) «Совершенствование технологии квалификационной сварки и наплавки», Казимиренко Ю.А. (НУК им. адмирала Макарова), «Повышение износостойкости электродуговых покрытий из стали 65Г», Брыкова М. Н. (Национальный университет «Запорожская политехника») «Сварка с ускоренным охлаждением стали 120Г3С2», Матвиенко М.В. (Херсонский филиал НУК) «Влияние свойств прослойки на напряженно-деформированное состояние паяных соединений жаропрочных сплавов» и др.

По результатам конференции приняты решения, в которых, в частности, отмечены высокий уровень научных и технических разработок, боль-

шинство из которых имеет практическую реализацию, представленные в докладах материалы рекомендованы для опубликования в профессиональных периодических изданиях, а также предложено сделать традиционным проведение таких конференций.

В рамках конференции состоялось совещание представителей Южного региона Общества сварщиков Украины (ОСУ) под председательством президента ОСУ докт. техн. наук, профессора Максимов С.Ю., на котором были обсуждены вопросы совершенствования Национальной системы аттестации сварщиков и функционирования института экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС).

Также, за весомый вклад в развитие сварочного производства Почетными дипломами были награждены ведущие предприятия в Николаевской области ООО «АМИТИ» и ООО «Технолазер-Сварка», а за личный вклад – Почетными дипломами и памятным медалями канд. техн. наук, профессор кафедры сварочного производства НУК Костин А. М. и главный инженер ООО «АМИТИ» канд. техн. наук Ярослав Ю. А.

С.В. Драган, А.М. Костин

СОБРАНИЕ АССОЦИАЦИИ «ЭЛЕКТРОД»

16 октября 2019 г. в Москве в рамках международной выставки «Weldex/Россварка 2019» (15–18 октября) состоялось внеочередное общее собрание ассоциации «Электрод» (АЭ). В нем приняли участие около 30 руководителей и ведущих специалистов предприятий-производителей сварочных материалов, оборудования и сырья для их производства, научных организаций, торгующих компаний России, Украины, Беларуси. Среди них: ООО «Сумы-Электрод», ЧАО «ПлазмаТек», ООО

«Ротекс», ООО «Техпром», ООО «Тантал ЛТД», ООО «Ижорские сварочные материалы», ООО «Мелдис-Ферро», ООО «НТЦ «Пигмент», ООО «Керамглас», ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, ООО «ТМ.Велтек», ООО «Электрод-Бор», ООО «ПК «Хобэкс-Электрод», ООО «Оливер», ООО «Магнитогорский электродный завод», ЗАО «Завод сварочных материалов», ЗАО «Электродный завод», ООО «Новооскольский электродный завод», ООО «Судиславский завод сварочных материалов»,

ООО «Ситтек», ООО «Регион-сервис», Институт ФПМ СО РАН.

Присутствующих тепло поблагодарила президент АЭ, директор ООО «Техпром» Е.А. Палиевская за участие в работе собрания и пожелала всем дальнейших успехов.

На собрании было заслушано сообщение исполнительного директора Ассоциации В.Н. Липодаева о работе дирекции в период после проведения семинара в Гомеле, в частности, по популяризации деятельности АЭ в средствах массовой информации, актуализации сайта, информационной поддержке членов АЭ. С интересом были заслушаны выступления Ю.Н. Сараева (ИНПМ СО РАН), З.А. Сидлина (ООО «Техпром») о прошедших недавно Всероссийской конференции в Томске («Сварка в России-2019: современное состояние и перспективы» (4–7.09) и конференции в Москве «Проволока. Крепеж» (25–26.09).

Конференция в Томске была посвящена 100-летию со дня рождения выдающегося ученого Бориса Евгеньевича Патона. Ее участники присоединились к многочисленным поздравлениям юбиляра, пожелали ему здоровья и профессионального долголетия во благо мировой науки. Решением конференции было отмечено как высокий уровень ее организации и проведения, так и целесообразность ежегодного проведения конференции в различных регионах.

В выступлении З.А. Сидлина было отмечено, что развитие метизной отрасли в России имеет большое значение для всей промышленности, поскольку метизная продукция используется практически во всех сферах, начиная от крупных инвестиционных проектов до обычных домохозяйств. По итогам 2018 г. объем выпуска метизной продукции в РФ достиг 2,3 млн т. Дальнейшее развитие отрасли требует новых рынков сбыта и общеэкономического роста в стране. Как скоро это произойдет, и по каким направлениям пойдет развитие метизной промышленности, обсудили участники 8-ой Общероссийской конференции «Проволока-крепеж 2019». В фокусе внимания участников конференции были следующие вопросы:

- производство и потребление метизной продукции в России и за рубежом;
- современные требования к метизной продукции, новые виды, новые материалы;
- вопросы взаимодействия метизных заводов с поставщиками сырья;



- дистрибуция и металлоторговля всем спектром метизной продукции, возможности для развития СМЦ;

- инвестиционные, производственные и сбытовые программы крупных производителей метизной продукции;

- новые игроки на рынке, прогнозы их развития.

З.А. Сидлин озвучил объемы производства покрытых электродов по регионам РФ за последние 3 года. Он также отметил, что получено отрицательное заключение Минпромторга на новую редакцию закона о промбезопасности, монополизирующее деятельность на сварочном рынке.

Ю.Н. Сараев (ИФПМ СО РАН, г. Томск) рассказал также о прошедшем 15 октября в рамках выставки «Weldex/Россварка» общероссийском совещании сварщиков на тему «Проблемы сварочной отрасли и пути их решения».

На собрании выступили также главный технолог Магнитогорского электродного завода И.Н. Зверева и начальник отделения порошковых проволок Н. Пахомов (Березовский завод сварочных материалов), рассказавшие о новациях своих предприятий в области производства материалов, в частности, об освоении производства порошковых проволок малого диаметра.

И.М. Лившиц (ООО «Ижорские сварочные материалы») рассказал о прошедшей в Санкт-Петербурге выставке и конференции «Нева-2019».

Собрание заслушало заявление Е.А. Палиевской с просьбой освободить ее от обязанностей президента Ассоциации. Участники собрания удовлетворили ее просьбу и избрали президентом на трехлетний период директора Новооскольского электродного завода Ю.А. Глушкова. Учитывая весомый вклад в деятельности Ассоциации Е.А. Палиевской, она была выбрана почетным ее президентом.

В.Н. Липодаев

ДО 100-РІЧЧЯ ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ Б.С. КАСАТКІНА



1 листопада 2019 р. виповнилося 100 років від дня народження відомого вченого в галузі зварювального матеріалознавства, члена-кореспондента України, професора, доктора технічних наук Бориса Сергійовича Касаткіна. Народився він у 1919 р. в Томську, брав участь у бойових діях Великої Вітчизняної війни, був поранений. Після поранення навчався в Уральському політехнічному інституті і після закінчення у 1944 р. був направлений до роботи в ІЕЗ.

Його науково-дослідницька діяльність почалася під безпосереднім керівництвом Євгена Оскаровича Патона, який у 1945 р. довірив молодому співробітнику рішення дуже важливого та досить складного наукового завдання створення спеціальної марки сталі для виготовлення одного з перших у світі великих суцільнозварних мостів. Цьому мосту згодом було присвоєно ім'я Є.О. Патона. Поставлена задача була успішно вирішена Б.С. Касаткіним у 1947 р. Результати науково-дослідних робіт з даної теми лягли в основу кандидатської дисертації (1947 р.).

У 1951 р. Б.С. Касаткін був обраний вченим секретарем Інституту. Багато сил і енергії він віддавав підготовці молодих наукових кадрів для інституту, займався формуванням перспективних напрямків наукових досліджень в ІЕЗ.

У 1954 р. Б.С. Касаткін організував відділ фізико-хімічних методів досліджень. Під його керівництвом проводилися фундаментальні дослідження структури, фізичної і хімічної неоднорідності і мікрOMEХАНІЗМ крихкого руйнування зварних з'єднань різних конструкційних сталей, а також розроблялися методики дослідження зварних з'єднань із застосуванням електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу.

У 1959 р. Б.С. Касаткін очолив відділ зварювання перлитних та феритних сталей. Під його керівництвом були вирішені комплексні питання дослідження зварюваності, фізико-механічних властивостей зварних з'єднань, створення нових зварювальних матеріалів і технологій зварювання теплостійких сталей для виготовлення відповідальних конструкцій енергетичного машинобудування.

У 1962 р. Б.С. Касаткін захистив докторську дисертацію, а в 1963 р. йому було присвоєно звання професора. Вагомий внесок Б.С. Касаткіна у створення дослідження і впровадження нових високоміцних конструкційних сталей для зварних конструкцій гірничодобувної та дорожньої техніки, автодорожніх мостів і гідротехнічних споруд. У 1960-1970-х рр. при його безпосередній участі був споруджений з високоміцної сталі зварний міст через р. Смотрич у м. Кам'янець-Подільському, а також виготовлені зварні водоводи Нурекської ГЕС. У 1975 р. за роботи по створенню та освоєнню нових марок низьколегованих сталей високої міцності для зварних конструкцій і технології їх зварювання Б.С. Касаткіну була присуджена премія ім. Є.О. Патона.

У 1963 р. Б.С. Касаткін створив спеціалізовану лабораторію зі зварювання полімерних матеріалів, яка потім була перетворена у науковий відділ «Зварювання пластмас».

У 1969-1974 рр. Б.С. Касаткін за сумісництвом завідував кафедрою зварювального виробництва Київського політехнічного інституту. Багато сил і енергії віддавав розвитку вузівської науки, підготовці молодих кадрів. Завдяки зусиллям Б.С. Касаткіна почалося будівництво Навчального центру зварювання КПІ і ІЕЗ ім. Є.О. Патона. У 1976 р. Б.С. Касаткін був обраний членом-кореспондентом НАН України.

У 1970-1990 рр. Б.С. Касаткін брав участь у вирішенні складних проблем, пов'язаних з виготовленням на Харківському турбінному заводі важких роторів тихохідних парових турбін великої потужності (понад 1000 МВт) для атомних електростанцій. Велику увагу він приділяв розробці методів дослідження і регулювання напруг і деформацій при зварюванні конструкцій нової техніки.

Значний внесок він вніс у розробку та впровадження в промисловість нових зварювальних матеріалів, таких як окислювальні флюси для ав-

томатичного зварювання і покриті електроди для ручного зварювання високоміцних сталей у важкому і енергетичному машинобудуванні.

За розробку технології складання й автоматичного зварювання, а також створення спеціалізованої зварювальної апаратури для виготовлення важких роторів турбін великої потужності Б.С. Касаткіну у 1979 р. була присвоєна Державна премія УРСР. У 1981 р. і в 1986 р. Б.С. Касаткін був удостоєний премій Ради Міністрів СРСР, у 1991 р. — звання Заслужений діяч науки і техніки УРСР. Трудові досягнення Б.С. Касаткіна були також відзначені орденами і медалями СРСР.

За період з 1954 по 1985 рр. з керованого ним відділу виділилося більше 10 провідних самостійних відділів інституту. Великий внесок Б.С. Касаткін вніс в підготовку наукових кадрів в області

зварювального матеріалознавства для Якутського інституту проблем Півночі СВ АН СРСР.

Б.С. Касаткін — автор понад 350 наукових робіт і 55 винаходів. Їм була створена вітчизняна матеріалознавча школа в області технології зварювання високоміцних конструкційних низьколегованих сталей. Серед його учнів 4 доктори наук та 25 кандидатів наук. Ім'я Б.С. Касаткіна широко відоме серед вчених в області зварювального виробництва. Він користувався заслуженим авторитетом серед зварювальників СРСР. Б.С. Касаткін чуйно і доброзичливо ставився до співробітників, з якими працював, допомагав їм цінними порадами та ідеями.

Світлу пам'ять про Бориса Сергійовича Касаткіна, відомого вченого і педагога, обов'язковій і енергійній людині з вдячністю зберігають його колеги та учні.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Редколегія та редакція журналу

ПАМ'ЯТІ Б.О. МОВЧАНА



На 92-му році пішов з життя доктор технічних наук, професор, академік НАН України, видатний вчений-матеріалознавець, засновник наукової школи отримання нових матеріалів за допомогою електронно-променевої технології випаровування і конденсації в вакуумі (ЕВ-РВД), заслужений діяч науки і техніки України, Борис Олексійович Мовчан.

Після закінчення Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка за спеціальністю фізика металів у 1951 р. життя Б.О. Мовчана було нерозривно пов'язане з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона. Почавши свою трудову діяльність науковим співробітником, у 1954 р. Б.О. Мовчан захищає кандидатську дисертацію, а у 1961 р. — докторську. За період 1960–2003 рр.

Б.О. Мовчан був керівником наукового відділу електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона. У червні 1964 р. його обрали членом-кореспондентом Академії наук УРСР, а у березні 1978 р. — академіком.

Б.О. Мовчан отримав вітчизняне і міжнародне визнання і популярність як в області дослідження взаємозв'язку структури і властивостей неорганічних матеріалів (аморфних, нанокристалічних, дисперсно-зміцнених, мікрослойних, мікропористих) і захисних покриттів, осаджуваних з парової фази у вакуумі, так і в реалізації розроблених технологічних процесів і нових зразків електронно-променевого обладнання.

Б.О. Мовчан був автором понад 380 наукових публікацій, 7 монографій, понад 120 патентів. Він підготував 68 кандидатів і докторів технічних наук, був членом редколегій кількох наукових журналів.

З ініціативи Б.О. Мовчана і його активної участі були створені такі спільні підприємства, як українсько-голандське «Інтертурбіна-Патон» (1992 р.) і українсько-американське «Пратт енд Уїтні-Патон» (1993 р.). У 1994 р. їм було створено державне підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» (МЦ ЕПТ), яке продовжує роботи по розробці нових електронно-променевих технологій та обладнання як для зарубіжних замовників з США, КНР, Канади, Англії, так і для

українських замовників, серед яких НПО «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв) і ЗМКБ «Прогрес» (м. Запоріжжя).

Поряд зі створенням нових технологій Б.О. Мовчан розробляє і відповідне електронно-променеве обладнання для отримання нових матеріалів і нанесення захисних покриттів. Під його керівництвом було спроектовано та виготовлено 96 електронно-променевих установок різного призначення.

Трудова і наукова діяльність Б.О. Мовчана була відзначена низкою високих урядових нагород, серед яких — Державна премія УРСР в галузі науки і техніки, два ордена Трудового Червоного прапора, Ленінська премія за роботи в області електронно-променевих технологій, орден Леніна, премія Є.О. Патона НАН України. За особистий вагомий внесок у розвиток вітчизняної науки, зміцнення науково-технічного потенціалу України Б.О. Мовчан нагороджений орденом «За заслуги» III сту-

пеня, орденом Ярослава Мудрого V ступеня, йому присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки».

Б.О. Мовчан відзначений також зарубіжними почесними дипломами та преміями. У Китаї йому вручений Почесний диплом Міністерства авіаційної промисловості КНР і присвоєно почесне звання професора Пекінського університету аеронавтики та космонавтики. У США отримані два дипломи Американського вакуумного товариства. З 2016 р. Б.О. Мовчану в США була вручена премія ім. Р.Ф. Банши «За новаторські роботи в області електронно-променевого випаровування і діяльність керівника та наставника на трьох континентах протягом 60 років».

Світла пам'ять про Б.О. Мовчана надовго залишиться в серцях тих, хто його знав, разом з ним працював та жив.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародний центр електронно-променевих технологій
Редколегія журналу «Автоматичне зварювання»

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

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
1200 грн.	2400 грн.	90 дол. США	180 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою бандероллю.

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

Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів
на сайті видавництва www.patonpublishinghouse.com.
У 2019 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2017 рр. в форматі *.pdf.

Реклама в журналі «Автоматичне зварювання»

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках наступних розмірів

- ♦ Перша сторінка обкладинки, 200×200 мм
- ♦ Друга, третя та четверта сторінки обкладинки, 200×290 мм
- ♦ Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки, 200×290 мм
- ♦ Вклейка А4, 200×290 мм
- ♦ Розворот А3, 400×290 мм
- ♦ А5, 165×130 мм

Вартість реклами

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

Підписано до друку 20.11.2019. Формат 60×84/8. Офсетний друк.
Ум. друк. арк. 8,37.
Друк ТОВ «ДІА».

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

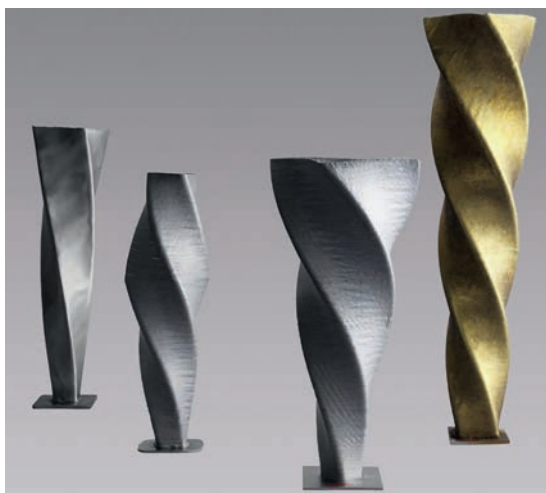
Пошаровий синтез за допомогою зварювальної дуги: економічний 3D-друк металевих виробів*

Технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги викликає значний інтерес у промисловців. Завдяки методу наплавки шарів виробництво за допомогою зварювальної дуги стає надзвичайно гнучким з погляду можливостей виготовлення деталей найрізноманітніших геометричних форм. Технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги за економічністю суттєво переважає інші методи адитивної металообробки, зокрема, коли йдеться про виготовлення прототипів і виробництво дрібних партій. Головним фактором оцінки якості виготовлених компонентів є процес зварювання. Процес Cold Metal Transfer, який розробила компанія Fronius, відповідає всім вимогам до процесів пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги.

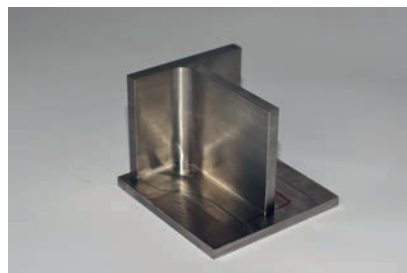
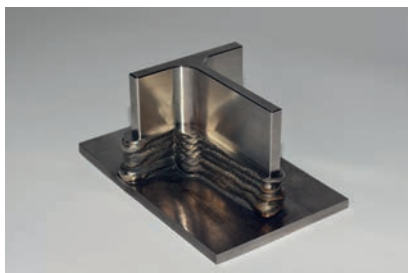
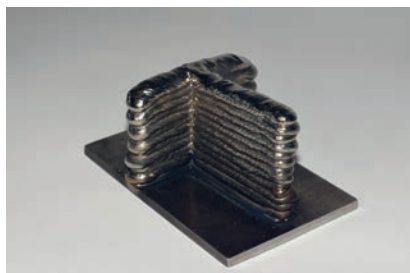
Методи пошарового синтезу забезпечують виготовлення деталей за рахунок поетапної наплавки шарів матеріалу. Найвідомішим методом пошарового синтезу є 3D-друк. Технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги, в основі якої лежить процес дугового зварювання, також дає змогу виготовляти металеві деталі шар за шаром, причому шари утворюються зі зварювального електрода, що поступово плавиться. Такий метод синтезу набуває особливої привабливості, наприклад, коли потрібно виготовити деталь складної геометричної форми, адже можливості розробки в такому разі практично ніщо не обмежує. Іншими суттєвими перевагами цього методу є висока швидкість та низька собівартість виробництва. Завдяки цим особливостям технологію пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги вигідно застосовувати для виготовлення прототипів і виробництва дрібних партій. Тривалість обробки, зношування інструментів і витрати матеріалів під час виробництва — особливо під час роботи за традиційними технологіями, що передбачають виточування деталей з твердої заготовки, — все це зумовлює зростання витрат.

Існує цілий ряд методів синтезу, які використовують для виготовлення металевих деталей. За принципом роботи ці методи можна розділити на два основні типи: порошкові процеси та процеси з використанням дрітків. У порошкових процесах додавання нових шарів здійснюють, напильючи розплавлений металевий порошок. Найпоширеніший метод цього типу — плавлення часточок напиленого металевого порошку — забезпечує надзвичайно точні результати, проте сам процес синтезу досить повільний. З іншого боку, в процесах із використанням дрітків нові шари утворюються способом плавлення металевих присадних матеріалів у формі дроту лазерним променем, пучком електронів або зварювальною дугою. Цим процесам властива висока швидкість наплавлення, тому їх застосування дає змогу скоротити тривалість виробництва.

Пошаровий синтез за допомогою зварювальної дуги — це процес синтезу з використанням дрітків, в основі якого лежить метод дугового зварювання металевим електродом у середовищі захисного газу (GMAW). Окрім високої швидкості наплавлення (до 4 кг/год в разі використання сталей), технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги має безліч інших переваг. У майбутньому синтез із одночасним використанням декількох дрітків може забезпечити ще більшу швидкість наплавлення. Оскільки вартість витратних матеріалів і амортизаційне обладнання також є важливим фактором, технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги має ще одну велику перевагу: для її використання потрібна лише відповідна зварювальна система. Для впровадження цієї технології не потрібне дороге спеціальне обладнання — наприклад, вакуумні камери, що забезпечують більшу швидкість синтезу за допомогою електронних пучків.



Технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги дає змогу використовувати на виробництві найрізноманітніші присадні матеріали, зокрема, звичайну та хромонікелеву сталь, алюміній і бронзу

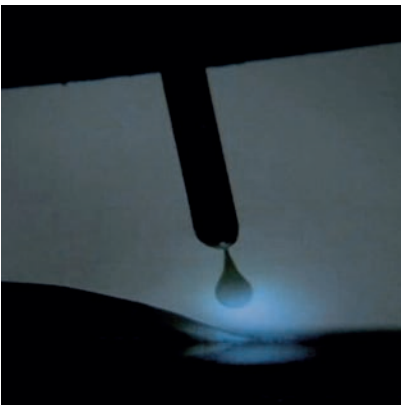


Під час пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги деталь (на малюнках деталей з титану) зварюють шар за шаром, а потім піддають механічній обробці

* Стаття на правах реклами.



Процес дугового зварювання металевим електродом у середовищі захисного газу Cold Metal Transfer ідеально забезпечує стабільність процесу зварювання та низький тепловий вплив



Дротовий електрод, який використовують у процесі зварювання CMT, механічно забезпечує відрив краплі. Це дає змогу скоротити витрати енергії та досягти меншої тривалості короткого замикання для «холодного» процесу зварювання

Порівняно з порошковими методами технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги вигідно відрізняється за рахунок великого асортименту сертифікованих типів дрітків. Вибір наявних порошкових матеріалів досить обмежений, а сертифікація нових і оформлення необхідних технічних паспортів можуть тривати роками, оскільки використання металевих порошків у цій галузі — порівняно нова технологія.

Критично важливими для технології пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги є стабільність процесу зварювання й ефективність відведення тепла. Рівень енергії процесу зварювання має бути достатньо низьким, щоб під час нанесення нового шару не розплавився попередній. Інакше кажучи, процес має бути якомога «холоднішим». Крім того, наварювані шари мають бути безперервними, однорідними та без бризок. Якщо в одному з шарів виникне дефект, його буде відтворено й у наступних.

Процес дугового зварювання металевим електродом у середовищі захисного газу CMT і варіанти керування ним цілком задовольняють ці вимоги. Він забезпечує стабільну зварювальну дугу та тривале контрольоване коротке замикання. Завдяки цим особливостям процесу рівень теплового впливу знижується, а нанесення матеріалу здійснюється майже без бризок. Таким чином він дає змогу запобігти виникненню дефектів.

Для використання з технологією пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги особливо добре підходять два варіанти керування процесом CMT. Перший варіант — характеристика адитивного процесу CMT, який було оптимізовано для використання з технологією пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги. Він забезпечує високу швидкість наплавлення за передачі мінімальної кількості тепла на синтезовану деталь. Другий варіант, а саме CMT Cycle Step, дає змогу додатково знижувати потужність зварювальної дуги за рахунок її керованої деактивації у фазі процесу. Водночас цей відносно «холодний» процес синтезу відрізняється дещо нижчою швидкістю наплавлення, тому за його використання надбудова шарів триває довше.

На сьогодні метод пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги з використанням зварювальних технологій компанії Fronius уже застосовують під час виробництва великого асортименту деталей для різноманітних галузей промисловості. До переліку таких виробів можна включити робочі колеса вентиляторів для електронної промисловості, які виготовляють із високоякісних матеріалів. Виточування подібних деталей із заготовок — надзвичайно дорогога процедура, адже під час таких робіт зазвичай витрачають багато матеріалу. Лиття ж далеко не завжди може забезпечити потрібні металургійні характеристики виробам із товщиною стінок усього 1,5 мм. Технологія пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги, що ґрунтується на CMT Cycle Step, дає змогу виготовляти лопаті вентиляторів зі сплаву на нікелевій основі за адитивним методом. За методом пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги можна навіть ремонтувати деталі.

Партнер із авіаційної галузі допоміг компанії Fronius реалізувати ще один варіант використання цієї технології. В авіаційній промисловості часто використовують титан, оскільки він відрізняється легкістю, а також високою міцністю, пружністю та стійкістю до корозії. Більшість деталей виготовляють способом механічної обробки. Втрати матеріалу в такому разі сягають до 90 %. Загалом це спричиняє високу вартість виробництва, значну тривалість виробничих процесів і зношування дорогого обладнання й інструментів. Водночас, щоб зробити поверхню деталі, яку було виготовлено методом пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги, гладенькою, достатньо лише мінімальної обробки. Титанові компоненти, які виготовлено за адитивним процесом CMT, не мають жодних проблем із недостатнім проплавленням і демонструють вражаючі металургійні характеристики. Впровадження адитивних процесів дає змогу суттєво зменшити витрати на інструменти, а також тривалість обробки та рівень зносу обладнання, а відтак і вартість обробки в цілому.

Зважаючи на всі ці фактори, технологію пошарового синтезу за допомогою зварювальної дуги цілком можна назвати гнучкою й економічною альтернативою традиційним методам виробництва деталей. Адитивний процес із використанням зварювальних технологій від компанії Fronius і процесу CMT можна порівняно легко впровадити на виробництві.



ТОВ «ФРОНІУС УКРАЇНА»
07455, Київська обл., Броварський р-н,
с. Княжичі, вул. Слави, 24
Тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44
E-mail: sales.ukraine@fronius.com
www.fronius.ua