

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б.Е. Патон

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

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

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

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

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

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

Рекомендовано к печати
редакционной коллегией журнала

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

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона — 60! 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Крикент И.В.,
Коваленко Д.В., Коваленко И.В.* Влияние тока и длины
дуги на характеристики дугового разряда при сварке
неплавящимся электродом 6

*Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Матвиенко М.В.,
Бутурля Е.А., Ермолаев Г.В.* Напряженно-деформиро-
ванное состояние сварных и паяных узлов из разно-
родных материалов с мягкой прослойкой при терми-
ческом нагружении 18

*Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Грищенко А.П.,
Вигилянская Н.В., Коломыцев М.В., Васильковская М.А.*
Структура и фазовый состав плазменных покры-
тий $ZrB_2-SiC-AlN$ на поверхности композицион-
ного материала C/C-SiC 25

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Грузевич А.В., Дереча Д.А. Газопорошковое напыление
как высокоэффективный метод повышения надежности
работы энергетического оборудования 36

Юрженко М.В. Особенности технологии и современ-
ные тенденции в области стыковой сварки полиэти-
леновых труб (Обзор) 46

Сварка за рубежом

3D печать в судостроении 54

Новый проект в области аддитивных технологий 57

ХРОНИКА

Киевская техническая ярмарка – 2019 59

Информация

TransSteel 2200 компании Fronius 61

Пути развития современного промышленного
предприятия 63

Автоматичне Зварювання

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

Головний редактор **Б.Є. Патон**

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

ЗМІСТ

CONTENTS

ОКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона — 60! 3

PWI EDTB is 60! 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Кривцун І.В., Демченко В.Ф., Крикент І.В., Коваленко Д.В., Коваленко І.В. Вплив струму та довжини дуги на характеристики дугового розряду при зварюванні неплавким електродом 6

Krivtsun I.V., Demchenko V.F., Krikent I.V., Kovalenko D.V., Kovalenko I.V. Effect of current and arc length on characteristics of arc discharge in non-consumable electrode welding 6

Квасницький В.В., Квасницький В.Ф., Матвієнко М.В., Бутурля Є.А., Ермолаєв Г.В. Напружено-деформований стан зварних та паяних вузлів з різнорідних матеріалів з м'яким прошарком при термічному навантаженні 18

Kvasniitsky V.V., Kvasniitsky V.F., Matvienko M.V., Buturlya E.A., Ermolaev G.V. Stress-strain state of welded and brazed units from dissimilar materials with soft interlayer at thermal loading 18

Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Грищенко А.П., Вігілянська Н.В., Коломицев М.В., Васильківська М.А. Структура та фазовий склад плазмових покриттів $ZrB_2-SiC-AlN$ на поверхні композиційного матеріалу C/C-SiC 25

Borisov Yu.S., Borisova A.L., Grishchenko A.P., Vigilanskaya N.V., Kolomiitsev M.V., Vasilkovskaya M.A. Structure and phase composition of $ZrB_2-SiC-AlN$ plasma coatings on the surface of C/C-SiC composite materials 25

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

INDUSTRIAL

Грузевич А.В., Дереча Д.А. Газопорошкове напилення як високоефективний метод підвищення надійності роботи енергетичного обладнання 36

Gruzevich A.V., Derecha D.A. Gas-powder spraying as a high-performance method of increase of operation reliability of power equipment 36

Юрженко М.В. Особливості технології та сучасні тенденції в області стикового зварювання поліетиленових труб (Огляд) 46

Yurzhenko M.V. Features of technology and modern trends in the field of butt welding of polyethylene pipes (Review) 46

Зварювання за кордоном

Welding abroad

3D друк в суднобудуванні 54

3D printing in shipbuilding 54

Новий проект в області адитивних технологій 57

New project in the field of additive technologies 57

ХРОНІКА

NEWS

Київський технічний ярмарок – 2019 59

Kiev Technical Fair 2019 59

Інформація

Information

Ефективне зварювання завдяки зварювальній системі TransSteel 2200 компанії Fronius 61

TransSteel 2200 of Fronius Company 61

Шляхи розвитку сучасного промислового підприємства 63

Ways of development of modern industrial enterprise 63

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

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

Адреса редакції

Address

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

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

ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона — 60!

Создавая в 1929 г. сварочную лабораторию в Киеве, Евгений Оскарович Патон считал своей основной задачей доказать с научной точки зрения возможность и необходимость использования электросварки в самых различных областях.

И только весной 1934 г. Институт, разбросанный до этого в различных помещениях, собрался под крышей здания на улице Горького и начал свою работу. Два направления деятельности Института в области испытания и проектирования сварных конструкций для механизации и автоматизации дуговой сварки, организационно оформились в виде отделов.

Работы по усовершенствованию дуговых автоматов Евгений Оскарович связывал с работой нового проектно-конструкторского отдела и весной 1937 г. на должность руководителя отдела был принят Платон Иванович Севбо. Он обладал достаточным опытом конструирования уникального оборудования для механизации процессов, к тому же взял на себя функции главного конструктора Института.

Дееспособность такой структуры была проверена самой жизнью.

Проектно-конструкторское бюро в 1939–1941 гг. продолжило работы по конструированию разнообразного оборудования для автоматизации сварки открытой дугой и под слоем флюса. В марте 1941 г. за большой вклад в разработку и внедрение разработанной аппаратуры для



ОКТБ сегодня. У макета бронетранспортера слева направо: зав. отд. ОКТБ В.Г. Пичак, директор ОКТБ Г.В. Жук, зам. директора ОКТБ И.В. Горячкин



скоростной автоматической сварки под флюсом Евгению Оскаровичу Патону была присуждена Государственная премия СССР.

К июню этого же года автоматическая сварка была освоена на 18 заводах страны.

Большую работу осуществляло проектно-конструкторское бюро в военные годы, проектируя установки для сварки корпусов и башен танков. В период 1941–1944 гг. Институт был эвакуирован в город Нижний Тагил и размещен на территории Уральского вагоностроительного завода.

В течение 1942–1943 гг. конструкторское бюро разработало более 40 различных установок для сварки узлов танков, авиабомб, артиллерийских систем и других видов вооружения, все разработки были внедрены на оборонных предприятиях Урала.

За выдающиеся успехи в механизации и автоматизации сварочных работ при изготовлении боевой техники 2 марта 1943 г. Е.О. Патону было присвоено звание Героя Социалистического труда, а Б.Е. Патон был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В мае 1944 г. ИЭС возвратился в Киев. Е.О. Патон сосредоточил работы своих сотрудников на решение проблем по восстановлению и развитию народного хозяйства страны.

После смерти Е.О. Патона в 1953 г. Институт возглавил Борис Евгеньевич Патон. Продолжая внедрять идеи Е.О. Патона (структура Института по схеме «лаборатории — конструкторское бюро — опытное производство») в жизнь. В 1957 г. Совет Министров УССР издал постановление, которым предусматривалась организация Опытного-конструкторского бюро Института электросварки им. Е.О. Патона на хозяйственном расчете.

После завершения работ по организации ОКБ и оформления всей документации, приказом по Институту № 506а от 15 мая 1959 г., небольшой коллектив работников (100 человек) 16 мая 1959 г. приступил к работе.

В октябре 1978 г. ОКБ реорганизовано в Опытное конструкторско-технологическое бюро (ОКТБ).

С момента основания ОКБ возглавил д-р техн. наук А.И. Четвертко — опытный конструктор, талантливый организатор, бесменно руководивший коллективом в течение 27 лет. В дальнейшем коллектив ОКТБ возглавляли В.Ф. Мошкин, С.И. Притула, В.С. Романюк и в настоящее время Г.В. Жук.

В тесном сотрудничестве с учеными и специалистами ИЭС, коллективом ОЗСО, ведущими предприятиями Украины, ОКТБ на протяжении 60 лет создает оборудование для различных механизированных способов сварки, внедряет в производство законченные научно-исследовательские разработки.

Разработки ОКТБ в области оборудования для осуществления многофункциональных сварочных и родственных технологий широко известны в Украине, странах ближнего зарубежья и в мире.

Сегодня коллектив ОКТБ продолжает творческую работу по созданию новых образцов сварочного оборудования, которое находит применение практически во всех областях промышленности, металлургии, строительстве, при подводных работах и даже в медицине.

Приоритетными направлениями деятельности современного ОКТБ являются:

- разработка оборудования и технологии для автоматической и механизированной дуговой MIG/MAG сварки с импульсными алгоритмами работы. Управляемый обратными связями по параметрам дугового процесса, дозированный по объему каплеперенос дает возможность более эффективно перераспределять погонную энергию нагрева высокотемпературной и низкотемпературной околошовных зон, что позволяет сохранить баланс фаз аустенитно-ферритной микроструктуры металла в зоне теплового влияния.

В ОКТБ проводятся работы по оптимизации управления технологическими процессами при дуговой автоматической и полуавтоматической MIG/MAG сварке спецсталей:

- аустенитные нержавеющие стали типа AISI 304 (аналоги DIN 1.4301 и 08X18H10);
- ферритные нержавеющие стали типа AISI 430 (аналоги DIN 1.4016 и 42X47);
- дуплексные нержавеющие стали типа AISI 2205 (аналоги EN1.4462 и X2Cr22Ni5Mo3N).

- Разработка оборудования, технологии и сварочных материалов для дуговой подводной сварки и резки «мокрым способом», с помощью которого можно осуществлять:

- ремонт нефте-, газо- и других трубопроводов;
- ремонт корпусов судов на плаву;
- ремонт портовых сооружений;
- восстановление стационарных плавающих платформ и причалов;
- разделке затонувших кораблей, отработанных нефтепроводов при очистке прибрежных акваторий.

Наше оборудование позволяет существенно повысить производительность сварочных работ, снизить расход сварочных материалов и потребление электроэнергии при выполнении сварки и резки металлоконструкций во всех пространственных положениях как в пресной, так и в морской воде на глубинах до 200 м.

- Разработан комплекс оборудования и технология для автоматической дуговой подводной сварки «мокрым способом» внутри вертикальных трубных сооружений, с помощью которого можно обеспечить приварку заглушек к внутренней поверхности трубы с минимальным внутренним диаметром 119...130 мм на удалении объекта сварки на расстояние более 200 м.

Комплекс прошел производственную апробацию на объектах «GFE», г. Лондон, где обеспечил надежную герметизацию труб теплообменника энергосберегающих систем на глубинах до 230 м. Комплекс АДСП-200 является базой для автоматов других назначений, например, при заглушке (глушении) труб нефтяных и газовых месторождений и обрезке этих труб на разных глубинах.

- Разработка оборудования и технологии для дуговой приварки шпилек (болтов, стержней, штифтов, шипов, упоров и т. д.) при выполнении работ в высотном строительстве при возведении стальных конструкций, в монолитном строительстве, в мостостроении, энергетике. Разработанные установки обеспечивают приварку шпилек из низкоуглеродистых и нержавеющих сталей диаметром от 2,0 до 30,0 мм в среде защитных газов, под флюсом, в защитных керамических кольцах, а также без защиты и могут применяться в стационарных и монтажных условиях.

- Направление механизации и автоматизации сварки корпусов легкобронированной техники для Укроборонпрома и заказчиков также является одним из приоритетных для ОКТБ. С участием ОКТБ спроектирован, оснащен сварочным и механическим сварочным оборудованием и запущен в эксплуатацию завод по производству легкобронированной техники на территории заказчика в дальнем зарубежье.

Наша история очень богата. Мы сознательно не пытались перечислять выдающиеся разработки внедренного оборудования, количество наград и премий, полученных за эти годы сотрудниками нашего конструкторского бюро, так как основное достижение ОКТБ — это люди, которых судьба связала с нашим предприятием. Тысячи фамилий останутся на страницах истории ОКТБ и с уверенностью можно сказать, что результаты их труда всегда будут примером верности служения родному Опытному конструкторско-технологическому бюро Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Жук Г.В., Горячкин И.В., Пичак В.Г.

ВЛИЯНИЕ ТОКА И ДЛИНЫ ДУГИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ*

И.В. Кривцун, В.Ф. Демченко, И.В. Крикент, Д.В. Коваленко, И.В. Коваленко

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

Методом математического моделирования изучено влияние силы тока и длины аргоновой дуги атмосферного давления с тугоплавким (вольфрамовым) катодом на тепловые, электромагнитные и газодинамические характеристики дуговой плазмы, включая характеристики ее теплового, электрического и динамического (силового) воздействия на поверхность анода. Дан краткий обзор математических моделей, привлекаемых для этой цели. Температурные поля и картины протекания тока в столбе дуги иллюстрируются соответствующими изотермами и токовыми линиями. Для анализа силового воздействия тока дуги на плазму ее столба используются расчетные данные о распределении магнитного давления в дуговой плазме и соответствующей магнитной силе, действующей на плазму. Анализируются также особенности распределения полного давления и скорости движения плазмы в столбе дуги. Приведены расчетные данные о распределениях плотности электрического тока и теплового потока на поверхности водоохлаждаемого и испаряющегося анода, а также о распределении потенциала плазмы вдоль границы анодного слоя в зависимости от силы тока и длины дуги. Введены понятия эффективных значений анодного и катодного падений потенциала. Исходя из расчетной величины теплового потока в анод и экспериментальной ватт-амперной характеристики аргоновой дуги с тугоплавким катодом, получены данные о величине эффективного КПД такой дуги в диапазоне токов 50...300 А для дуг длиной 1,5; 2 и 3 мм. Установлена зависимость размеров токового канала и зоны теплового воздействия дуги на анод от тока и длины дуги. Библиогр. 26, рис. 22.

Ключевые слова: дуга с тугоплавким катодом, ток дуги, длина дуги, дуговая плазма, столб дуги, анодный слой, плотность тока на аноде, тепловой поток в анод, математическое моделирование

Для эффективного использования электрической дуги как источника тепла при сварке плавлением необходимо располагать достоверной информацией о тепловом, электрическом и динамическом (силовом) воздействии дуговой плазмы на свариваемый металл в зависимости от способа и режима сварки. В случае сварки неплавящимся электродом, когда свариваемый металл является анодом дуги, такое воздействие определяется совокупностью процессов энерго-, массо- и электропереноса в плазме столба и анодной области дуги, а его характеристики зависят от силы тока, длины дуги и состава защитного газа. Поскольку экспериментальное определение характеристик тепловых, электромагнитных и газодинамических процессов в дуговой плазме, а также ее теплового, электрического и динамического воздействия на поверхность сварочной ванны затруднено, задачей данной работы является детальное количественное исследование указанных характеристик методами математического моделирования. В качестве объекта исследования будем рассматривать осесимметричную аргоновую дугу с тугоплавким катодом, схема которой изображена на рис. 1, в

диапазоне токов $I = 50...300$ А и следующих значениях длины дуги: $L = 1,5; 2; 3$ мм. Именно

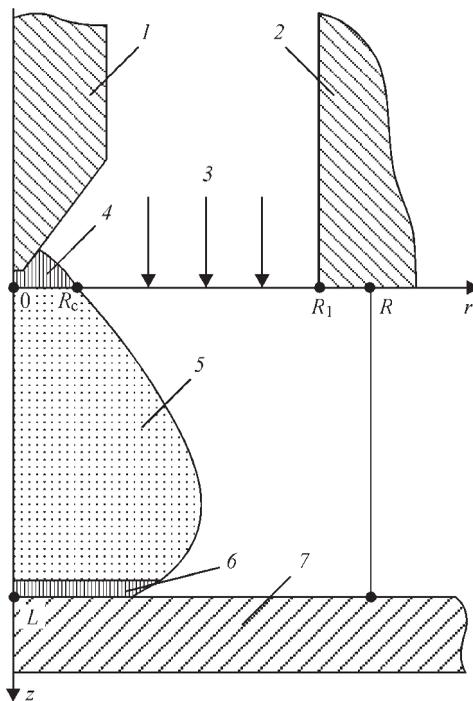


Рис. 1. Схема к расчету характеристик дуги с тугоплавким катодом: 1 — вольфрамовый катод; 2 — сопло для подачи защитного газа; 3 — защитный газ; 4 — катодная область; 5 — столб дуги; 6 — анодный слой; 7 — анод; R_c — радиус катодной области; R_1 — радиус сопла; R — радиус расчетной области

*По материалам доклада, представленного на IX Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях», 10–14 сентября 2018 г., Одесса.

такие параметры дугового разряда характерны для сварки неплавящимся электродом в инертном газе (ТИГ).

Существует множество подходов и моделей для численного исследования процессов переноса энергии, импульса, массы и заряда в плазме столба электрической дуги, а также анодных процессов применительно к условиям ТИГ сварки [1–13]. Однако в большинстве работ по комплексному моделированию дуги с тугоплавким катодом используются весьма упрощенные модели анодного слоя [1–7], тогда как в работах, специально посвященных исследованию анодных явлений [8–13], недостаточное внима-

ние уделяется их взаимосвязи с процессами, протекающими в столбе дуги. Для корректного учета этой взаимосвязи в данной работе будем использовать самосогласованную математическую модель столба и анодной области дуги при сварке неплавящимся электродом, предложенную в работе [14] и модифицированную в [15].

Характеристики плазмы столба дуги. Рассмотрим вначале распределенные характеристики тепловых, электромагнитных и газодинамических процессов в плазме столба аргоновой дуги, горячей между тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым (неиспаряющимся) анодом. На рис. 2

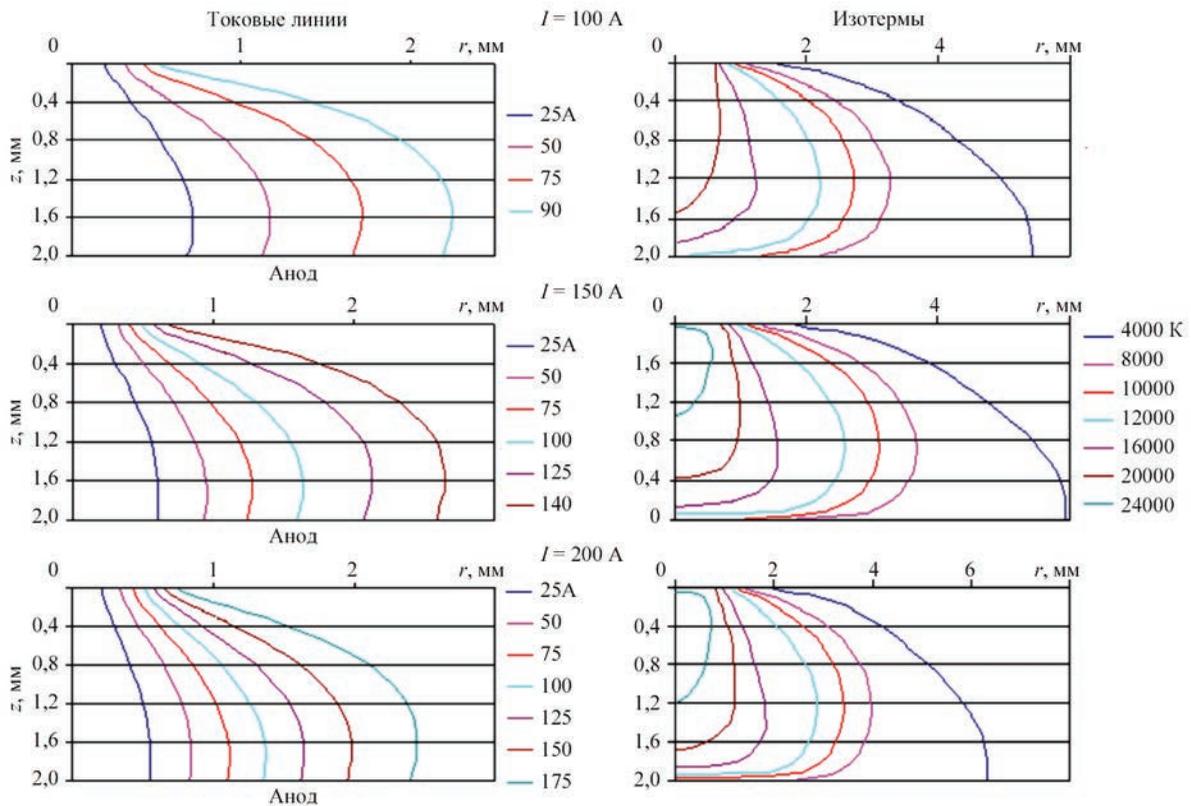


Рис. 2. Токовые линии и изотермы температурного поля в столбе дуги

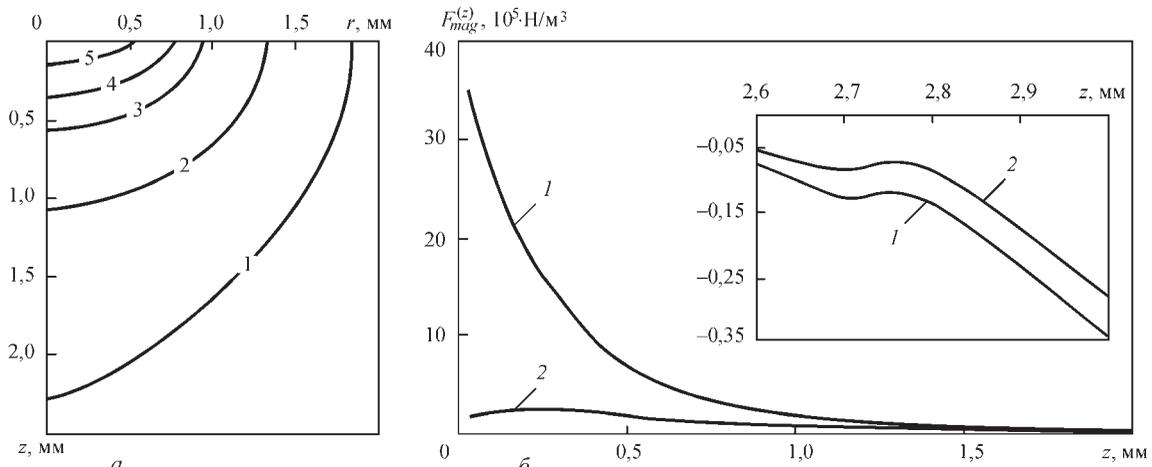


Рис. 3. Силовые характеристики электромагнитного поля в столбе дуги: а — поле изобар магнитного давления (1 — $P_{\text{mag}} = 100$ Па; 2 — 200; 3 — 400; 4 — 600; 5 — 1000); б — распределение аксиальной составляющей магнитной силы по длине столба дуги (1 — на оси дуги; 2 — при $r = 1$ мм)

представлены результаты моделирования температурного поля и картины протекания тока в дуге длиной $L = 2$ мм для трех характерных значений тока дуги $I = 100, 150, 200$ А. Слева изображены токовые линии, представляющие собой образующие поверхностей вращения, ограничивающих области дуги, в пределах которых протекает определенная часть полного тока. На правых рисунках приведены изотермы температурного поля дуговой плазмы. Конфигурации токовых линий в приэлектродных областях рассматриваемой дуги свидетельствуют о ее контракции в этих областях: вблизи катода значительной и существенно меньшей вблизи анода. С увеличением длины дуги изотермы и, соответственно, токовые линии расширяются, что свидетельствует об уменьшении плотности тока в более длинных дугах. Сопоставляя изотермы с токовыми линиями, можно сделать вывод о том, что размеры токового канала, в котором протекает 90 % тока дуги, примерно вдвое меньше токопроводящей области столба дуги (аргоновая плазма становится электропроводной при температуре выше 4500 К).

Рассмотрим теперь газодинамические характеристики дуговой плазмы. В качестве основного силового фактора, определяющего газодинамическую обстановку в столбе дуги, выступает электромагнитная сила, возникающая в результате взаимодействия тока дуги с собственным магнитным полем. Актуальной составляющей этой силы является вихревая составляющая силы Лоренца [16]

$$\vec{F}_{rot}(r, z) = -\mu_0 \frac{I^2(r, z)}{4\pi^2 r^3} \vec{e}_r,$$

где $\{r, z\}$ — цилиндрические координаты (см. рис. 1); \vec{e}_r — единичный радиус-вектор; $I(r, z)$ — ток, протекающий через круг радиуса r в аксиальном сечении z столба дуги; μ_0 — универсальная магнитная постоянная.

Данная центростремительная сила создает в токовом канале магнитное давление

$$P_{mag}(r, z) = -\int_{rot}^{\infty} F_{rot}(r, z) dr,$$

перепад которого можно трактовать как некоторую силу магнитной природы \vec{F}_{mag} , возбуждающую движение дуговой плазмы из области высоких значений магнитного давления в сторону его уменьшения.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов свидетельствуют о том, что в областях столба дуги с повышенной плотностью тока возрастает сжимающее действие вихревой силы \vec{F}_{rot} и, соответственно, увеличивается магнитное

давление. Рис. 3 иллюстрирует распределение силовых характеристик электромагнитного поля в столбе дуги длиной 3 мм при токе 150 А. Магнитное давление имеет максимальное значение в осевой зоне прикатодной области столба дуги и быстро уменьшается по радиусу и вдоль координаты z , отсчитываемой от катода (см. рис. 3, а). В рассматриваемом случае максимальная величина магнитного давления не превышает 1000 Па, что составляет менее 1 % атмосферного давления. Однако вследствие быстрого изменения магнитного давления в указанной области его градиент оказывается весьма значительным. Так, в осевой зоне прикатодной плазмы аксиальная составляющая магнитной силы $F_{mag}^{(z)}$ достигает величины порядка $3 \cdot 10^6$ Н/м³ (см. рис. 3, б).

Магнитная сила, локализуемая в осевой зоне прикатодной плазмы, инициирует движение дуговой плазмы в основном по направлению от катода к аноду. В средней части столба дуги градиент магнитного давления становится пренебрежимо малым и движение плазмы продолжается по инерции. Вблизи поверхности анода этот градиент меняет знак (см. вставку на рис. 3, б), т. е. магнитная сила оказывается направленной от анода к катоду. В рассматриваемых здесь условиях сила инерции плазменного потока в прианодной области столба дуги превосходит $F_{mag}^{(z)}$. Поэтому действие последней ограничивается лишь частичным торможением плазменного потока, наряду с его газодинамическим торможением вблизи поверхности анода. При сварке неплавящимся электродом за счет применения специальных технологических средств, таких, например, как использование активирующего флюса [17], воздействие на дугу сфокусированным излучением СО₂-лазера [18], можно существенно повысить плотность электрического тока на аноде. В этом случае аксиальная компонента магнитной силы вблизи его поверхности, оставаясь отрицательной, возрастает по абсолютной величине и при определенных размерах области анодной привязки дуги становится способной противодействовать силе инерции потока плазмы. В результате этого в прианодной плазме может возникнуть движение дуговой плазмы навстречу набегающему потоку. Газодинамическое взаимодействие этих двух потоков способно сформировать двухвихревую циркуляцию плазмы в столбе дуги (см. сценарий 2 в работе [16]).

Распределение аксиальной компоненты вектора скорости движения плазмы вдоль оси дуги приведено на рис. 4.

Характерно, что при малых значениях тока дуги начало торможения плазменного потока

смещено ближе к катоду, тогда как с увеличением тока область торможения смещается в сторону анода. Отметим также, что с увеличением длины дуги скорость движения потока плазмы заметно возрастает, объяснением чему является увеличение поперечных размеров ее столба (см. рис. 2) и, соответственно, уменьшение его газодинамического сопротивления.

Распределения полного давления на оси дуги длиной 3 мм и на поверхности анода показаны на рис. 5. Вдоль оси дуги давление изменяется немонотонно (см. рис. 5, а): вблизи катода оно повышено вследствие сжимающего воздействия вихревой силы $\vec{F}_{rot}(r, z)$ и, соответственно, высоких значений магнитного давления (см. рис. 3, а); в центре столба дуги полное давление уменьшает-

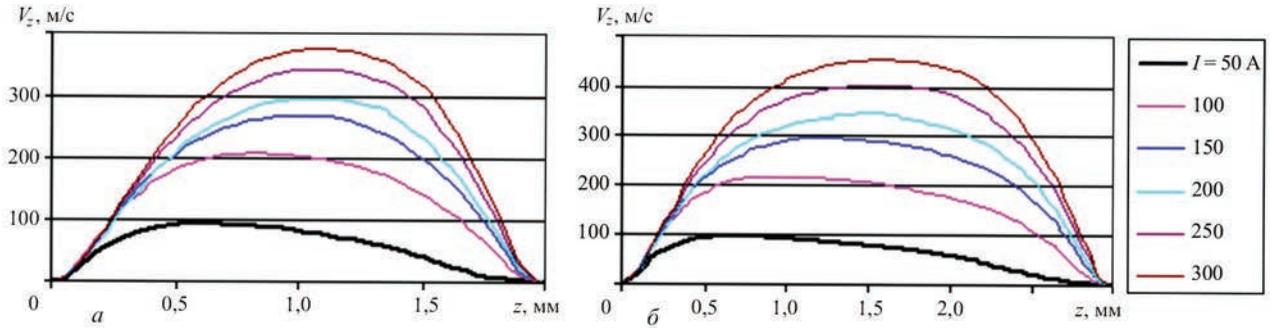


Рис. 4. Распределение аксиальной компоненты вектора скорости плазмы вдоль оси дуги: а — $L = 2$ мм; б — 3

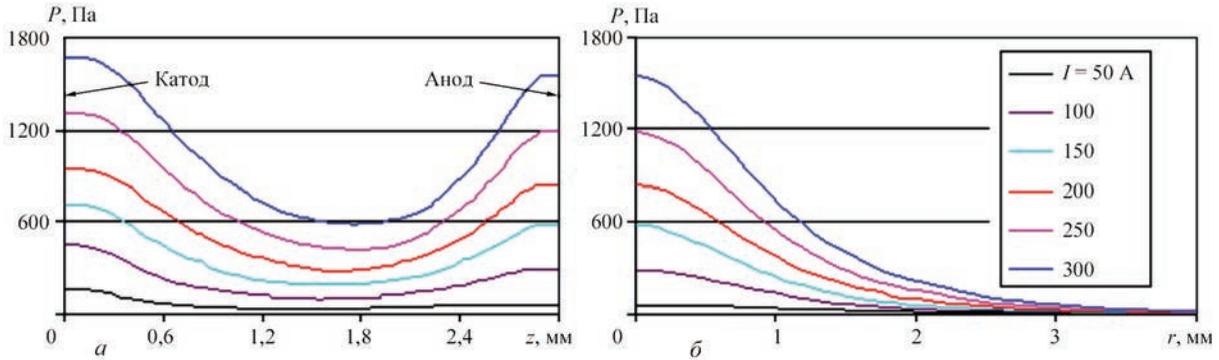


Рис. 5. Полное давление в плазме дуги длиной 3 мм: а — на оси дуги; б — на поверхности анода

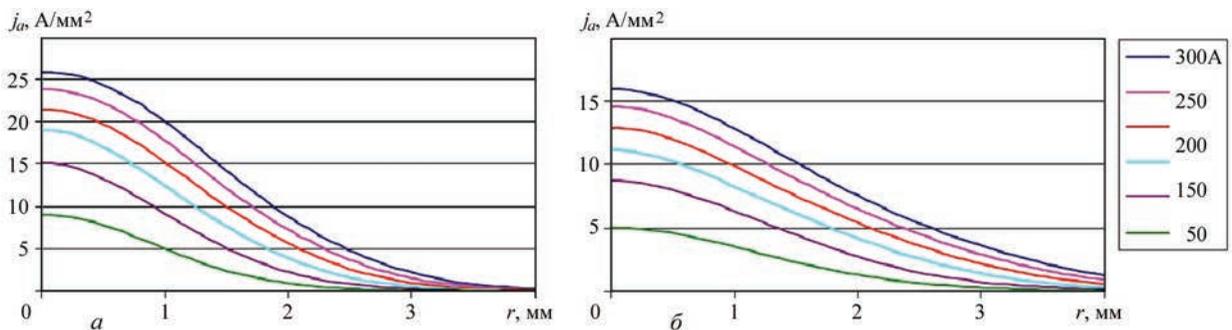


Рис. 6. Распределение плотности тока дуги на поверхности анода: а — $L = 2$ мм; б — 3

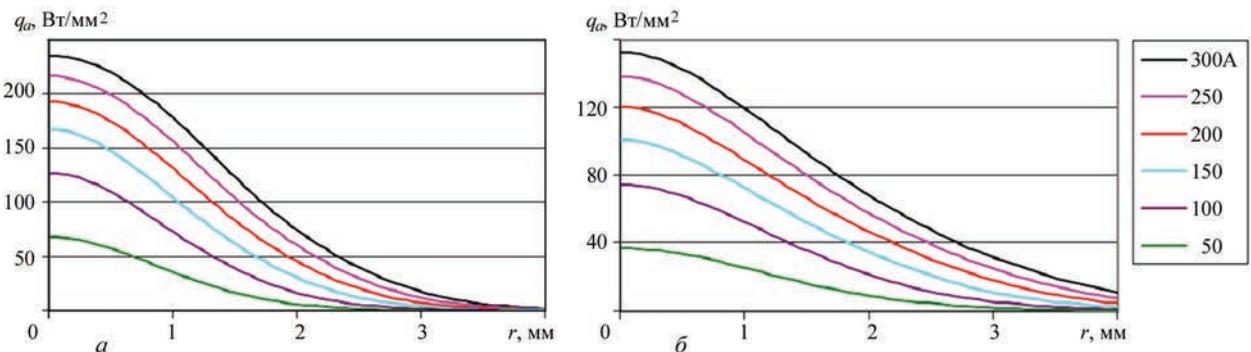


Рис. 7. Распределение теплового потока, вводимого дугой в анод: а — $L = 2$ мм; б — 3

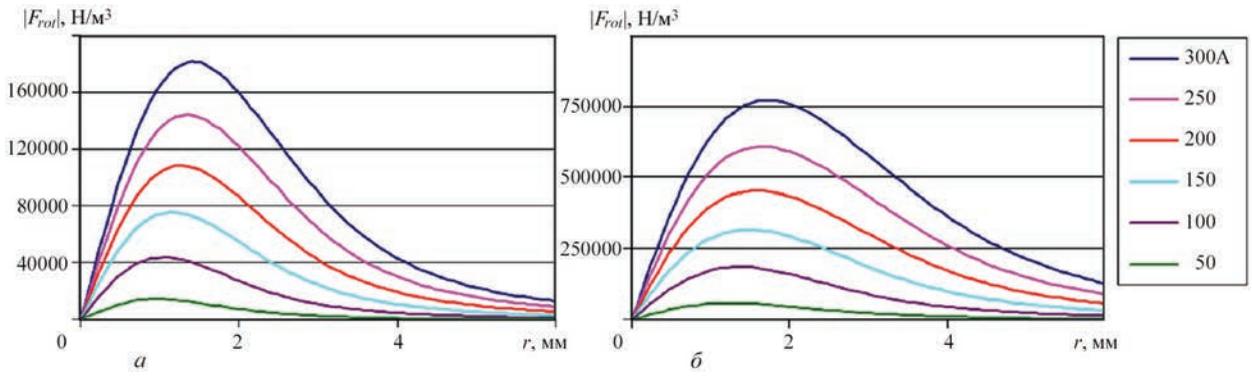


Рис. 8. Распределение вдоль поверхности анода вихревой составляющей силы Лоренца: $a — L = 2$ мм; $b — 3$

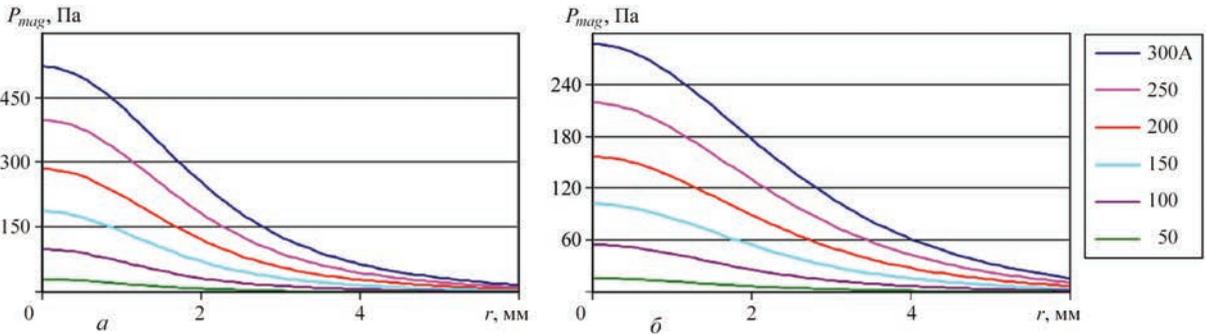


Рис. 9. Распределение вдоль поверхности анода магнитного давления: $a — L = 2$ мм; $b — 3$

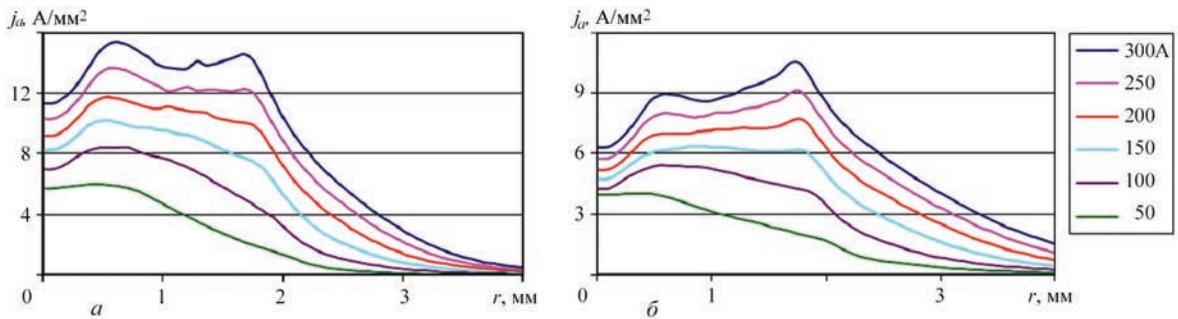


Рис. 10. Распределение плотности тока дуги на поверхности испаряющегося анода: $a — L = 2$ мм; $b — 3$

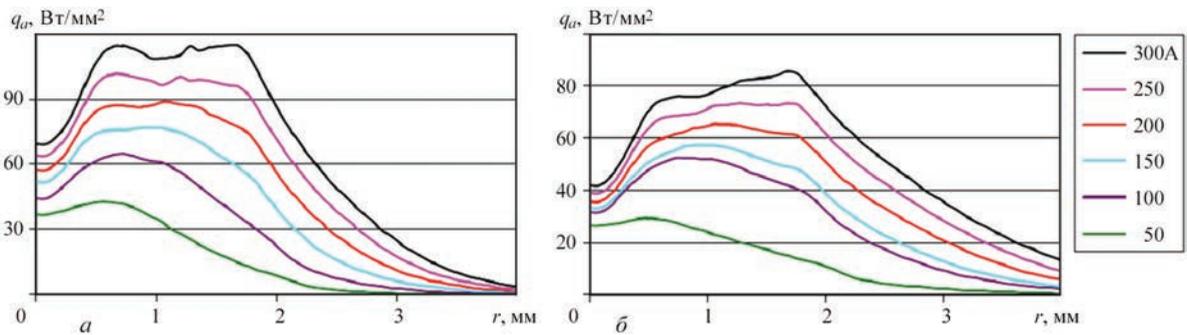


Рис. 11. Распределение теплового потока, вводимого дугой в испаряющийся анод: $a — L = 2$ мм; $b — 3$

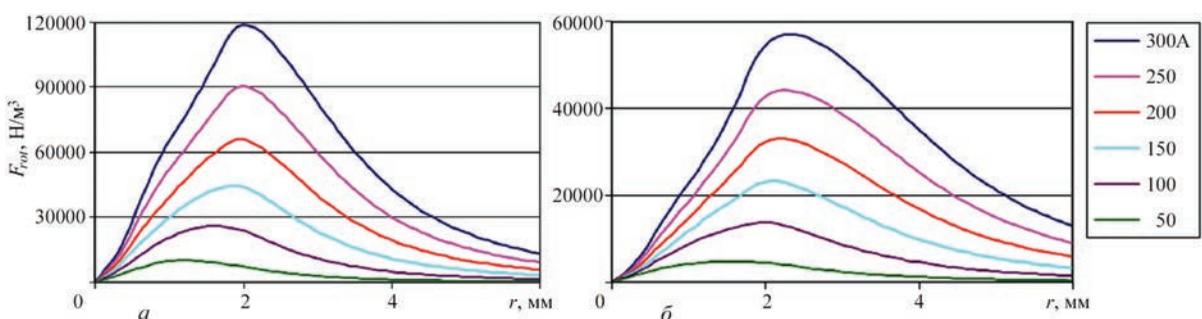


Рис. 12. Распределение вдоль поверхности испаряющегося анода вихревой составляющей силы Лоренца: $a — L = 2$ мм; $b — 3$

ся в результате радиальной разгрузки плазменно-го потока и относительно малого магнитного давления, а вблизи анода давление вновь возрастает вследствие торможения потока плазмы на его поверхности. Отметим, что поля давления в дугах длиной 2 и 3 мм мало отличаются. Что касается полного давления на поверхности анода, то оно возрастает с увеличением тока дуги (см. рис. 5, б).

Необходимо подчеркнуть, что приведенное на рис. 5, б распределение полного давления на поверхности анода формируется как сумма магнитного давления и газодинамического давления набегающего потока плазмы. Учитывая, что скачок магнитного давления на границе раздела «плазма – металл анода» равен нулю, актуальным с точки зрения деформации свободной поверхности сварочной ванны является лишь газодинамическое давление, образующееся вследствие торможения потока плазмы вблизи указанной поверхности.

Характеристики анодной области дуги. Перейдем к рассмотрению распределенных характеристик электрического, теплового и силового воздействия дуговой плазмы на поверхность анода. На рис. 6, 7 приведены распределения по поверхности водоохлаждаемого (неиспаряющегося) анода плотности электрического тока $j_a(r)$ и теплового потока $q_a(r)$, вводимого дугой в анод. Как следует из представленных на этих рисунках расчетных зависимостей, плотность тока на аноде и удельный тепловой поток в анод уменьшаются с увеличением длины дуги, что согласуется с экспериментальными данными работы [19].

С уменьшением длины дуги контракция тока на аноде возрастает: расчетные значения анодной плотности тока на оси дуги длиной 2 мм более чем в 1,5 раза выше по сравнению с дугой, имеющей длину 3 мм (ср. рис. 6, а, б). Соответственно этому увеличивается и силовое воздействие вихревой составляющей силы Лоренца \vec{F}_{rot} как на поверхности сварочной ванны, так и в ее объеме, что приводит к интенсификации гидродинамического течения расплава и повышению проплавляющей способности дуги [16]. Распределения $|F_{rot}|$ на поверхности анода для дуг длиной 2 и 3 мм показаны на рис. 8, а распределения магнитного давления изображены на рис. 9.

Важным фактором, влияющим на характеристики плазмы столба дуги и ее взаимодействия с поверхностью анода при сварке неплавящимся электродом, является многокомпонентность дуговой плазмы, связанная с испарением металла с поверхности сварочной ванны. На рис. 10–12 приведены распределения плотности тока, теплового потока и вихревой составляющей силы Лоренца на поверх-

ности анода из низкоуглеродистой стали, испаряющегося в диффузионном режиме, при модельном распределении его температуры в зоне анодной привязки дуги: $T_s(r) = (T_{s0} - T_\infty)\exp(-a^2r^2) + T_\infty$, где $T_{s0} = 3050$ К — температура поверхности на оси дуги; $T_\infty = 500$ К — температура поверхности на значительном удалении от оси, а коэффициент сосредоточенности a определяется таким образом, чтобы радиус расплавленной зоны на поверхности стального анода составлял 2,5 мм [20].

Как следует из сравнения рис. 10 и рис. 6 плотность тока на поверхности испаряющегося анода оказывается существенно меньше, чем в случае водоохлаждаемого анода, причем наиболее заметное снижение $j_a(r)$ наблюдается в центре области анодной привязки дуги, где формируется локальный минимум указанной величины. Аналогичным образом ведет себя и плотность теплового потока, вводимого дугой в испаряющийся анод (ср. рис. 11 и рис. 7). Что касается уменьшения плотности тока и теплового потока в анод при увеличении длины дуги (см. рис. 6, 7), то эта тенденция сохраняется и для испаряющегося анода (см. рис. 10, а, б и рис. 11, а, б).

Отмеченное снижение плотности тока на поверхности анода при учете испарения его материала вызывает соответствующее уменьшение вихревой составляющей силы Лоренца \vec{F}_{rot} на поверхности сварочной ванны (см. рис. 8, 12), что приводит к ослаблению конвективного переноса тепла в ее объеме, снижая тем самым проплавляющую способность дуги с испаряющимся анодом.

Еще одним фактором, определяющим характеристики электрического, теплового и силового воздействия дуги на поверхность анода, является то, что анодное падение потенциала U_a , определяемое как разность между потенциалом поверхности анода ϕ_a и потенциалом плазмы на границе анодного слоя ϕ_{pa} , не является постоянным в области анодной привязки дуги. Ввиду высокой проводимости металлических материалов поверхность анода является практически эквипотенциальной, поэтому электрический потенциал анода ϕ_a можно с хорошим приближением считать постоянным. Что касается величины ϕ_{pa} , то, поскольку определяющие ее параметры (температура прианодной плазмы и плотность тока на аноде) имеют неоднородные распределения вдоль поверхности анода (см. рис. 2, б), указанная величина, а, следовательно, и анодное падение потенциала также являются неоднородными в области анодной привязки дуги [20].

В качестве иллюстрации на рис. 13 приведены распределения потенциала плазмы вдоль гра-

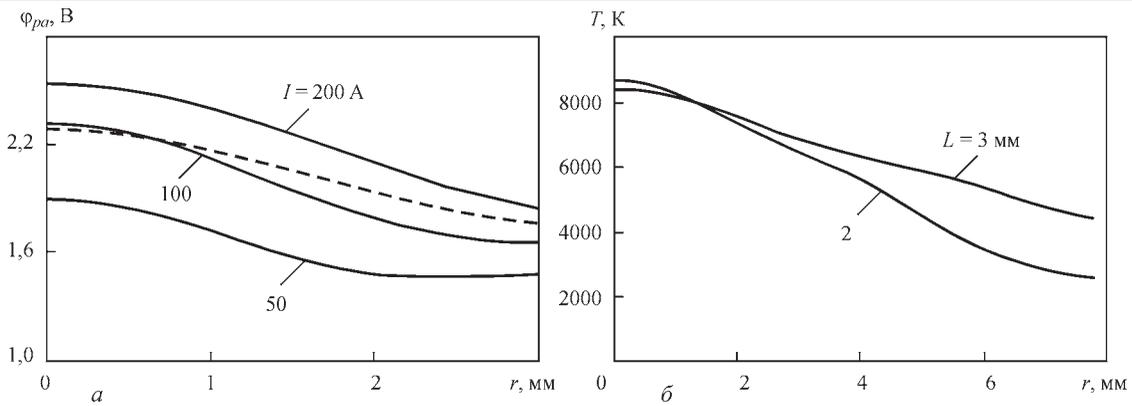


Рис. 13. Распределения потенциала плазмы вдоль границы анодного слоя со столбом дуги (а) при различных значениях тока дуги длиной 2 мм (сплошные кривые) и для 100-амперной дуги длиной 3 мм (штриховая кривая), а также распределения температуры прианодной плазмы вдоль поверхности анода (б) для 100-амперной дуги длиной 2 и 3 мм (потенциал поверхности анода принят постоянным и равным нулю)

ницы анодного слоя со столбом дуги с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом, имеющей длину 2 и 3 мм, в сопоставлении с соответствующим распределением температуры прианодной плазмы. Большая крутизна спада зависимости $\phi_a(r)$ для дуги длиной 2 мм по сравнению с дугой 3 мм при токе 100 А (см. рис. 13, а) обусловлена аналогичным характером изменения температурной кривой (см. рис. 13, б).

Поскольку граница анодного слоя не является изопотенциальной, то здесь существует отличный от нуля радиальный градиент потенциала и, соответственно этому, вектор плотности тока имеет радиальную компоненту j_r , причем, чем больше крутизна радиального изменения ϕ_{pa} , тем больше оказывается соответствующая компонента плотности тока. Данный эффект иллюстрируется рис. 14, на котором представлено изменение j_r вдоль границы анодного слоя для дуг длиной 2 и 3 мм при токе 100 А. С ростом j_r (для более коротких дуг) угол между вектором плотности тока на аноде и осью дуги увеличивается, что свидетельствует о более сильном сужении токового канала по направлению к аноду и, соответственно, более высокой плотности тока на аноде (см. рис. 6).

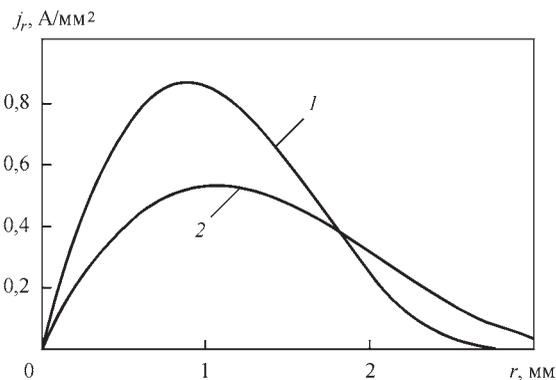


Рис. 14. Распределения вдоль поверхности анода радиальной компоненты вектора плотности тока: 1 — L = 2 мм; 2 — 3

В заключение данного раздела следует обратить особое внимание на тот факт, что анодное падение потенциала $U_a = \phi_a - \phi_{pa}$ в рассматриваемых дугах является отрицательным, что согласуется с известными расчетными и экспериментальными данными [8, 13, 21, 22].

Интегральные характеристики дуги. Важной интегральной характеристикой, определяющей электрические и энергетические свойства дугового разряда, является его вольт-амперная характеристика (ВАХ), которая связывает напряжение на дуговом промежутке U с током дуги I . На рис. 15 представлены результаты аппроксимации по методике, описанной в [23], экспериментальных данных о ВАХ аргоновой дуги с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом при различных значениях длины дуги: $L = 1,5; 2, 3$ мм. Вольт-амперной характеристике дуги может быть поставлена в соответствие ее ватт-амперная характеристика, устанавливающая связь мощности дуги $P = IU$ с силой тока I (см. рис. 15, б).

Полное напряжение на дуге U обычно представляется в виде суммы $U = U_c + U_p + U_a$, где U_c — катодное падение потенциала; U_p — напряжение на столбе дуги; U_a — анодное падение [24]. Соответственно этому мощность дуги может быть представлена в виде $P = P_c + P_p + P_a$, где $P_c = U_c I$, $P_p = U_p I$ и $P_a = U_a I$ — мощности, выделяемые в катодной области, столбе дуги и анодной области, соответственно. Поскольку, как уже было отмечено, анодное падение потенциала является отрицательным ($U_a < 0$), мощность дуги P меньше суммарной мощности, выделяющейся в столбе и катодной области дуги на величину $|P_a|$, затрачиваемую на поддержание анодного слоя. Эти, в целом правильные соотношения, требуют дальнейшего уточнения с точки зрения того, что следует понимать под величинами U_c, U_p, U_a с учетом изменения электрического потенциала вдоль границ

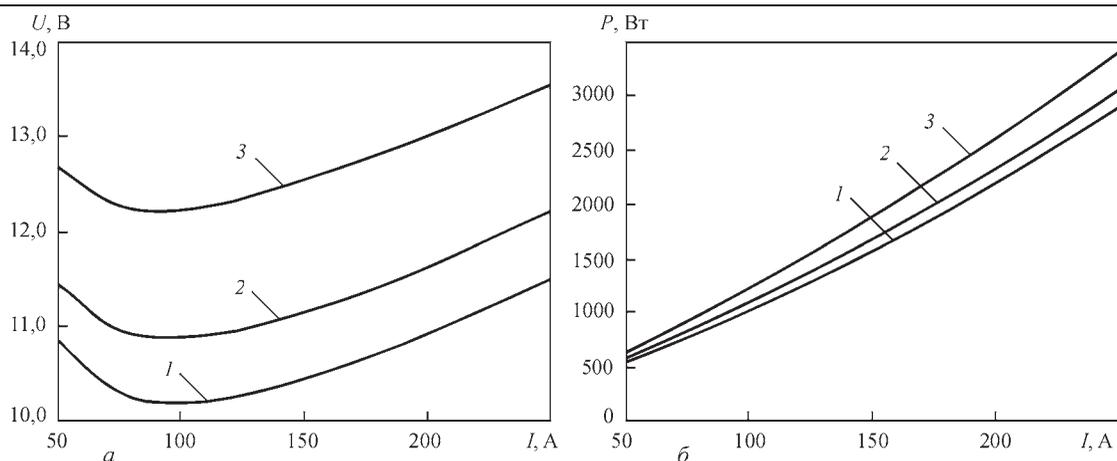


Рис. 15. Вольт- (а) и ватт-амперные (б) характеристики аргоновой дуги с тупоплавким катодом и медным водоохлаждаемым (неиспаряющимся) анодом: 1 — $L = 1,5$ мм; 2 — 2; 3 — 3

раздела анодной и катодной областей со столбом дуги.

В силу высокой проводимости металла анода и катода потенциалы φ_a и φ_c их поверхностей можно полагать практически постоянными, поэтому полное напряжение на дуге может быть определено как разность соответствующих потенциалов, т. е. $U = \varphi_a - \varphi_c$. Такое общепринятое определение напряжения в виде разности потенциалов непригодно для расчета катодного и анодного падений, а также напряжения на столбе дуги. Поэтому требуется дать иное определение указанных величин, причем таким образом, чтобы оставались справедливыми интегральные законы Ома и Джоуля–Ленца. С этой целью на границах Γ_{pa} и Γ_{pc} , разделяющих анодную и катодную области со столбом дуги, введем эффективные (усредненные) значения потенциалов Φ_{pa} и Φ_{pc} следующим образом:

$$\Phi_{pa} = \frac{1}{I} \int_{\Gamma_{pa}} \varphi_{jn} d\Gamma_{pa}; \quad \Phi_{pc} = \frac{1}{I} \int_{\Gamma_{pc}} \varphi_{jn} d\Gamma_{pc} \quad [20].$$

Тогда эффективное падение напряжения на столбе дуги можно определить как разность эффективных значений соответствующих потенциалов, т. е. положить $\langle U_p \rangle = \Phi_{pa} - \Phi_{pc}$. Аналогич-

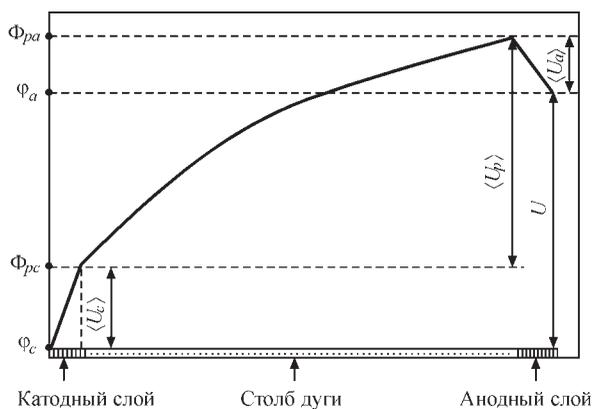


Рис. 16. Схема распределения электрического потенциала и эффективные составляющие напряжения на дуге

ным образом определяются эффективные анодное $\langle U_a \rangle = \varphi_a - \Phi_{pa}$ и катодное $\langle U_c \rangle = \Phi_{pc} - \varphi_c$ падения потенциала.

На рис. 16 приведена схема распределения электрического потенциала φ и введенные как указано выше эффективные составляющие напряжения на дуговом промежутке, при этом полное напряжение на дуге может быть представлено в виде суммы соответствующих эффективных составляющих: $U = \langle U_c \rangle + \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle$ с учетом того, что $\langle U_a \rangle < 0$. В терминах введенных эффективных величин падений напряжения на отдельных участках дуги суммарный баланс соответствующих мощностей можно записать аналогичным образом: $P = \langle P_c \rangle + \langle P_p \rangle + \langle P_a \rangle$, где $\langle P_c \rangle = I \langle U_c \rangle$, $\langle P_p \rangle = I \langle U_p \rangle$, $\langle P_a \rangle = I \langle U_a \rangle$, при этом интегральный закон Джоуля–Ленца остается справедливым как для отдельных составляющих дугового разряда, так и для дуги в целом.

В рамках используемой модели дуги [14, 15] вследствие приближенного описания катодной области не представляется возможным дать теоретическую оценку эффективного значения катодного падения потенциала. Однако если вольт-амперная характеристика дуги известна (см. рис. 15, а), то эффективное катодное падение можно рассчитать по формуле $\langle U_c \rangle = U - \langle U_p \rangle - \langle U_a \rangle$, воспользовавшись при этом расчетными данными об эффективных падениях потенциала $\langle U_p \rangle$, $\langle U_a \rangle$, а также экспериментально измеренном напряжении на дуге U .

На рис. 17 приведены экспериментальные и расчетные зависимости U , $\langle U_p \rangle$, $\langle U_a \rangle$ от силы тока для аргоновой дуги длиной 2 мм, горящей между тупоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом. Вычисленные как указано выше значения эффективного катодного падения потенциала в зависимости от тока дуги приведены на рис. 18. На этом же рисунке приведены результаты экспери-

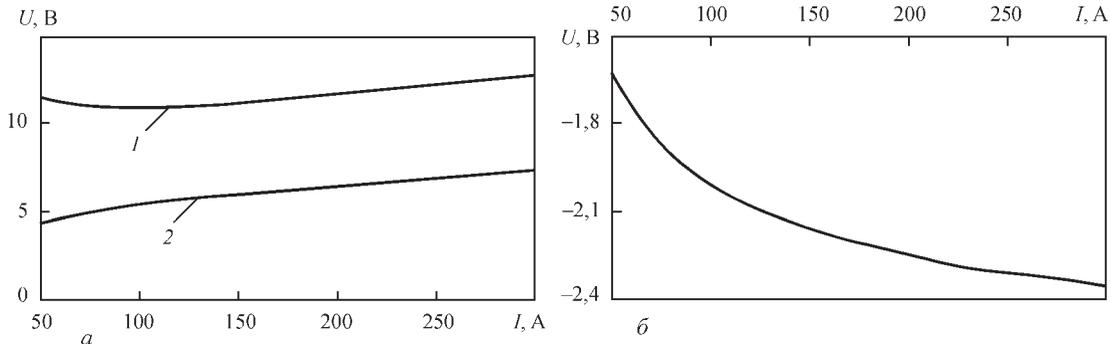


Рис. 17. Напряжение на дуге длиной 2 мм и его составляющие в зависимости от тока: а — полное напряжение на дуге U (I — эксперимент); эффективное значение напряжения на столбе дуги $\langle U_p \rangle$ (2 — расчет); б — эффективное значение анодного падения потенциала $\langle U_a \rangle$ (расчет)

ментального определения катодного падения [25]. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показывает их соответствие с точностью не хуже 15 %, что свидетельствует о вполне приемлемой адекватности математической модели, используемой в настоящей работе.

Обратимся теперь к интегральным характеристикам анодных процессов в рассматриваемых дугах. Как следует из рис. 17, б, эффективное анодное падение потенциала в аргоновой дуге с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом, являясь отрицательным, возрастает по абсолютной величине с увеличением тока дуги, при этом ее длина практически не влияет на $\langle U_a \rangle$. Роль анодного падения потенциала в полном напряжении на дуге является достаточно существенной. В частности, при токе 200 А расчетное значение эффективного анодного падения для аргоновой дуги длиной 3 мм равно $-2,24$ В, что составляет около 17 % напряжения на дуге $U = 13$ В (см. кривую 3 на рис. 15, а). Точно таким же образом соотносятся затраты энергии на поддержание анодного слоя по сравнению с полной мощностью дуги P .

Важным фактором, влияющим на анодное падение потенциала в дугах с тугоплавким катодом, является испарение материала анода. Расчетные

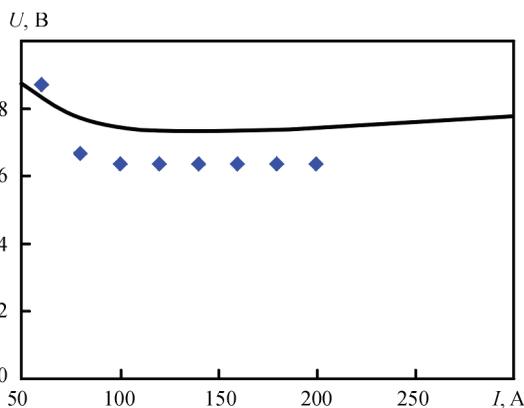


Рис. 18. Эффективное катодное падение потенциала $\langle U_c \rangle$: сплошная кривая — расчет; маркеры — экспериментальные данные [25]

зависимости $\langle U_a \rangle$ от I для дуг длиной 2 мм с медным водоохлаждаемым анодом и стальным испаряющимся анодом приведены на рис. 19. Как следует из представленных на этом рисунке кривых эффективное значение анодного падения в дуге с испаряющимся катодом, оставаясь отрицательным, оказывается меньше по абсолютной величине соответствующего значения для дуги с медным водоохлаждаемым анодом практически во всем рассматриваемом диапазоне токов.

В теории тепловых процессов при сварке принято оценивать полный тепловой поток

$$Q_a = 2\pi \int_0^{\infty} r q_a(r) dr,$$

вводимый дугой в анод, исходя из простой формулы $Q_a = \eta P$, где η — эффективный КПД дуги, определяемый экспериментально. Это выражение не является универсальным, так как величина η при ТИГ сварке зависит от силы тока и длины дуги, свариваемого материала, защитного газа и других условий сварки. Поэтому определение эффективного КПД дуги требует в каждом конкретном случае проведения калориметрических измерений, что является малопродуктивным. Вместо этого можно провести расчетную оценку величины Q_a в зависимости от тока и длины дуги, что позволит, зная ее ватт-амперную характеристику, определить соответствующее значение η .

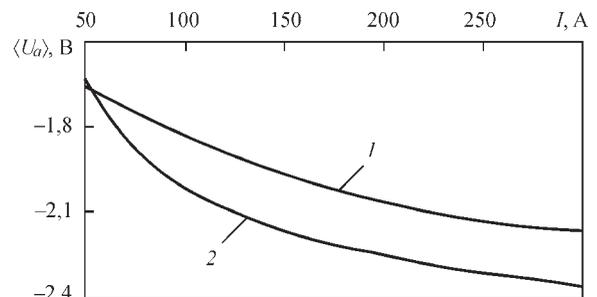


Рис. 19. Зависимости эффективного значения анодного падения потенциала от тока дуги со стальным испаряющимся анодом (1) и медным водоохлаждаемым анодом (2)

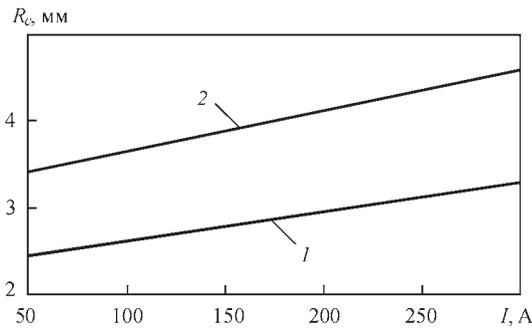


Рис. 20. Размеры токового и теплового пятен дуги на поверхности анода: 1 — $L = 2$ мм; 2 — 3

Оценим вначале эффективные размеры токового и теплового пятен дуги (соответственно R_c , R_h) на поверхности медного водоохлаждаемого анода в зависимости от тока и длины дуги. Под эффективным радиусом токового или теплового пятна будем понимать радиус круга, в пределах которого сосредоточено 95 % тока дуги I или, соответственно, полного теплового потока Q_a , вводимого дугой в анод. Данные, приведенные на рис. 20, показывают, что во всем рассматриваемом диапазоне токов $R_c \approx R_h$ и практически линейно возрастают с увеличением I . Кроме того, как и следовало ожидать, с увеличением длины дуги размеры зоны токового и теплового воздействия дуги на поверхность анода увеличиваются.

Расчетные зависимости от тока и длины дуги полной тепловой мощности

$$Q_a = 2\pi \int_0^{\infty} r q_a(r) dr,$$

вкладываемой в медный водоохлаждаемый анод, представлены на рис. 21, из которого следует, что величина Q_a практически линейно растет с увеличением тока дуги. Как уже было отмечено, входящий в определение Q_a удельный тепловой поток $q_a(r)$ уменьшается с увеличением длины дуги (см. рис. 7). Несмотря на это, полный тепловой поток в анод для дуги длиной 3 мм оказывается даже несколько больше, чем для дуги длиной 2 мм (см. рис. 21). Эта особенность более длинных

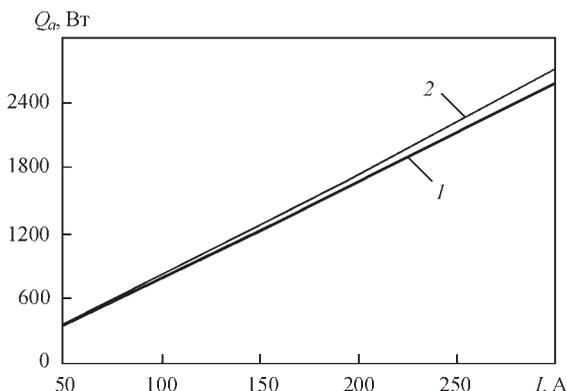


Рис. 21. Полный тепловой поток, вводимый дугой в анод: 1 — $L = 2$ мм; 2 — 3

дуг объясняется, с одной стороны, увеличением мощности дугового разряда (при том же токе повышается напряжение на дуге) и, с другой стороны, увеличением диаметра зоны теплового воздействия дуги на поверхность анода (см. рис. 20). Что касается сравнения расчетных значений с экспериментально измеренными, то, согласно данным работы [26], указанная величина при $I = 200$ А, $L = 3$ мм составляет 2,05 кВт и отличается от вычисленного значения $Q_a = 1,8$ кВт (см. кривую 2 на рис. 21) не более, чем на 15 %.

Данные, приведенные на рис. 21, вместе с экспериментальными данными о ватт-амперной характеристике дуги (см. рис. 15, б) позволяют провести расчетно-экспериментальную оценку эффективного КПД по формуле $\eta = Q_a / P$. Вычисленные таким образом значения η для дуг различной длины в зависимости от силы тока представлены на рис. 22 и свидетельствуют о том, что с увеличением длины дуги ее КПД уменьшается, а, кроме того, в рассматриваемом диапазоне токов величина η имеет максимум, находящийся в интервале 130...170 А.

В заключение данного раздела необходимо отметить, что процессы нагрева и плавления свариваемого металла (температурное поле, форма и размеры сварочной ванны) определяются не только величиной Q_a или η , но также зависят от таких распределенных по поверхности свариваемого металла характеристик дугового воздействия, как удельный тепловой поток в анод и плотность электрического тока на его поверхности. Эти характеристики по разному влияют на тепловое состояние свариваемого металла: первая из них ответственна за кондуктивный перенос энергии (теплопроводный механизм), а вторая определяет интенсивность гидродинамических потоков и, соответственно, конвективный перенос тепла в расплавленном металле.

Обсуждение и выводы. Приведенные в данной работе результаты расчета распределенных и интегральных характеристик свободноточащей

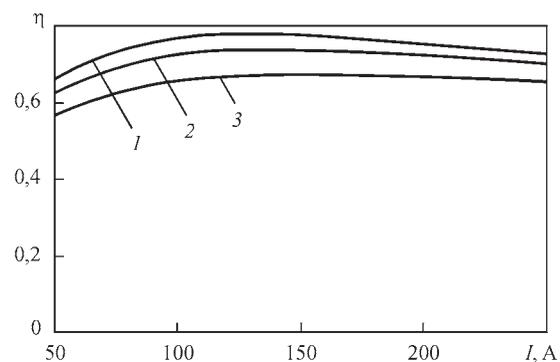


Рис. 22. Зависимости эффективного КПД дуги с медным водоохлаждаемым анодом от тока и длины дуги: 1 — $L = 1,5$ мм; 2 — 2; 3 — 3

аргоновой дуги с тугоплавким катодом и их зависимости от величины тока и длины дуги качественно являются вполне предсказуемыми. Новым обстоятельством, которое было обнаружено благодаря введению в рассмотрение токовых линий, является эффект сжатия токового канала в прианодной области, проявляющийся во всем рассмотренном диапазоне токов и длин дуг. С повышением плотности электрического тока на поверхности анода (свариваемого металла) увеличивается силовое воздействие тока дуги на металл сварочной ванны, которое способствует увеличению скорости течения расплава в донную часть ванны и, как результат, повышению глубины проплавления свариваемого металла. Таким образом, в отличие от теории тепловых процессов при сварке, базирующейся на теплопроводностном механизме переноса энергии, закон распределения плотности теплового потока в анод не является единственной характеристикой, определяющей форму сварочной ванны. Другим, не менее значимым фактором, влияющим на проплавляющую способность дуги, является закон распределения плотности тока на поверхности свариваемого металла. При всех прочих равных условиях для повышения проплавляющей способности дуги с тугоплавким катодом следует стремиться к уменьшению размера токового канала и, соответственно, повышению плотности электрического тока на поверхности анода. В данном контексте длина дуги не является единственным параметром, позволяющим управлять распределением тока на аноде. В арсенале сварочной науки имеется целый ряд технологических приемов, которые позволяют повысить плотность тока на аноде: использование активирующих флюсов, выбор специального состава защитного газа (смеси газов), воздействие на дугу сфокусированным лазерным излучением, высокочастотная импульсная модуляция сварочного тока и др. Применение этих активирующих дуговой процесс воздействий и их синергетических комбинаций является перспективным направлением совершенствования процесса сварки неплавящимся электродом.

Список литературы/References

1. Hsu K.C., Etemadi K., Pfender E. (1983) Study of the free-burning high-intensity argon arc. *J. of Appl. Phys.*, 54, 3, 1293–1301.
2. Hsu K.C., Pfender E. (1983) Two-temperature modeling of the free-burning high-intensity arc. *Ibid*, 54, 8, 4359–4366.
3. Lowke J.J., Morrow R., Haidar J. (1997) A simplified unified theory of arcs and their electrodes. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 30, 2033–2042.
4. Haidar J. (1999) Non-equilibrium modeling of transferred arcs. *Ibid*, 3, 263–272.

5. Sansonnets L., Haidar J., Lowke J.J. (2000) Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion. *Ibid*, 3, 148–157.
6. Masquere M., Freton P., Gonzalez J.J. (2007) Theoretical study in two dimensions of the energy transfer between an electric arc and an anode material. *Ibid*, 4, 432–446.
7. Tanaka M., Yamamoto K., Tashiro S. et al. (2008) Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding. *Welding in the World*, 52, 11/12, 82–88.
8. Dinulescu H.A., Pfender E. (1980) Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs. *J. of Appl. Phys.*, 5, 3149–3157.
9. Дюжев Г.А., Немчинский В.А., Школьник С.М. и др. (1983) Анодные процессы в сильноточном дуговом разряде. *Химия плазмы*, 0, 169–209.
10. Dyuuzhev, G.A., Nemchinsky, V.A., Shkolnik, S.M. et al. (1983) Anode processes in high-current arc discharge. *Khimiya Plazmy*, 0, 169–209 [in Russian].
11. Nazarenko I.P., Panevin I.G. (1989) Analysis of the near-anode processes character in argon arc discharge of high pressure. *Contrib. Plasma Phys.*, 2, 251–261.
12. Jenista J., Heberlein J.V.R., Pfender E. (1997) Numerical model of the anode region of high-current electric arcs. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 25, 883–890.
13. Amakawa T., Jenista J., Heberlein J. et al. (1998) Anode-boundary-layer behavior in a transferred, high intensity arc. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31, 2826–2834.
14. Tanaka M., Ushio M., Wu C.S. (1999) One-dimensional analysis of the anode boundary layer in free-burning argon arcs. *Ibid*, 3, 605–611.
15. Krivtsun I.V., Demchenko V.F., Krikent I.V. (2010) Model of the processes of heat, mass and charge transfer in the anode region and column of the welding arc with refractory cathode. *The Paton Welding Journal*, 6, 2–9.
16. Krikent I.V., Krivtsun I.V., Demchenko V.F. (2014) Simulation of electric arc with refractory cathode and evaporating anode. *Ibid*, 9, 17–24.
17. Demchenko V.F., Krivtsun I.V., Krikent I.V. et al. (2017) Force interaction of arc current with self magnetic field. *Ibid*, 3, 15–24.
18. Yushchenko K.A., Kovalenko D.V., Krivtsun I.V. et al. (2009) Experimental studies and mathematical modelling of penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding of stainless steel. *Welding in the World*, 53, 9/10, 253–263.
19. Krivtsun I.V., Krikent I.V., Demchenko V.F. et al. (2015) Interaction of CO₂-laser beam with electric arc plasma in hybrid (laser-arc) welding. *The Paton Welding Journal*, 3, 4, 6–15.
20. Yushchenko K.A., Kovalenko D.V., Kovalenko I.V. (2005) Peculiarities of A-TIG welding of stainless steel. Proc. of the 7th International Conference on Trends in Welding Research – Pine Mountain, Georgia, USA, pp. 367–376.
21. Krivtsun I., Demchenko V., Krikent I. et al. (2015) Distributed and integrated characteristics of the near-anode plasma of the welding arc in TIG and hybrid (TIG + CO₂-laser) welding. *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 11 – Techn. Universität Graz, Graz, Austria*, pp. 837–874.
22. Tanaka M., Ushio M. (1999) Observations of the anode boundary layer in free-burning arcs. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 3, 906–912.
23. Sanders N.A., Pfender E. (1984) Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs. *J. of Appl. Phys.*, 5, 714–722.
24. 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 Journal*, 2, 2–8.
25. Lancaster J.F. (1986) The physics of welding, 2nd Ed. *Pergamon Press*.
26. Uhrlandt D., Baeva M., Kozakov, R. et al. (2013) Cathode fall voltage of TIG arcs from a non-equilibrium arc model. *IW Essen, 2013, Group 212 – Physics of Welding*.
27. Nestor O.H. (1962) Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *J. of Appl. Phys.*, 33, 5, 1638–1648.

ВПЛИВ СТРУМУ ТА ДОВЖИНИ ДУГИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ

І.В. Кривцун, В.Ф. Демченко, І.В. Крикент, Д.В. Коваленко, І.В. Коваленко

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

Методом математичного моделювання вивчено вплив сили струму та довжини аргонової дуги атмосферного тиску з тугоплавким (вольфрамовим) катодом на теплові, електромагнітні та газодинамічні характеристики дугової плазми, включаючи характеристики її теплового, електричного і динамічного (силового) впливу на поверхню анода. Приведено короткий огляд математичних моделей, що залучаються для цієї мети. Температурні поля і картини протікання струму в стовпі дуги ілюструються відповідними ізотермами та струмовими лініями. Для аналізу силового впливу струму дуги на плазму її стовпа використовуються розрахункові дані про розподіл магнітного тиску в дуговій плазмі і відповідної магнітної сили, що діє на плазму. Аналізуються також особливості розподілу повного тиску і швидкості руху плазми в стовпі дуги. Наведено розрахункові дані про розподіли щільності електричного струму і теплового потоку на поверхні водоохолоджуваного аноду та аноду, що випарюється, а також про розподіл потенціалу плазми уздовж кордону анодного шару в залежності від сили струму і довжини дуги. Введено поняття ефективних значень анодного і катодного падінь потенціалу. Виходячи з розрахункової величини теплового потоку в анод і експериментальної ват-амперної характеристики аргонової дуги з тугоплавким катодом, отримані дані про величину ефективного ККД такої дуги в діапазоні струмів 50 ... 300 А для дуг довжиною 1,5; 2 і 3 мм. Встановлено залежність розмірів струмового каналу і зони теплового впливу дуги на анод від струму і довжини дуги. Бібліогр. 26, рис. 22.

Ключові слова: дуга з тугоплавким катодом, ток дуги, довжина дуги, дугова плазма, стовп дуги, анодний шар, щільність струму на аноді, тепловий потік в анод, математичне моделювання

EFFECT OF CURRENT AND ARC LENGTH ON CHARACTERISTICS OF ARC DISCHARGE IN NON-CONSUMABLE ELECTRODE WELDING

I.V. Krivtsun, V.F. Demchenko, I.V. Krikent, D.V. Kovalenko, I.V. Kovalenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

A method of mathematical modelling was used for investigation of effect of current intensity and length of argon atmospheric-pressure arc with refractory (tungsten) cathode on heat, electromagnetic and gas-dynamic characteristics of arc plasma, including the characteristics of its thermal, electric and dynamic (force) effect on anode surface. A short review of the mathematical models used for this purpose is given. The temperature fields and patterns of current flow in the arc column are illustrated with corresponding isotherms and current lines. Analysis of force effect of arc current on its column plasma is based on calculation data on distribution of magnetic pressure in arc plasma and corresponding magnetic force acting on plasma. Peculiarities of distribution of total pressure and rate of plasma movement in the arc column are also analyzed. The calculation data are given on distributions of density of electric current and heat flux on the surface of water-cooled and evaporating anode as well as on distribution of plasma potential along the boundary of anode layer depending on current intensity and arc length. The concepts of effective values of anode and cathode potential drop are implemented. Following from the calculation value of heat flux into anode and experimental watt-ampere characteristic of argon-arc with refractory cathode the data were obtained on value of net efficiency of such an arc in current range 50-300 A for arcs of 1.5; 2 and 3 mm length. Dependence of dimensions of current channel and zone of thermal effect of arc to anode on current and arc length was determined. 26 Ref., 22 Fig.

Keywords: arc with refractory cathode, arc current, arc length, arc plasma, arc column, anode layer, current density on anode, heat flux in anode, mathematical modelling

Поступила в редакцію 15.03.2019

Новая книга

Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с.

Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».



НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В.В. Квасницкий¹, В.Ф. Квасницкий², М.В. Матвиенко², Е.А. Бутурля², Г.В. Ермолаев²

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».
03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Национальный университет кораблестроения. 54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9.
E-mail: welding@nuos.edu.ua

Компьютерное моделирование методом конечных элементов использовали для исследования напряженно-деформированного состояния в соединениях однородных материалов при осевой нагрузке. Исследования выполнены с учетом пластических деформаций в мягких прослойках, которые обычно используют при диффузионной сварке для активации поверхностей и снижения остаточных напряжений, а при пайке промежуточной прослойкой является паяный шов, отличающийся от основного металла по физико-механическим свойствам. Показано, что вдоль стыка, как в соединяемых металлах, так и прослойке, эквивалентные напряжения распределены более равномерно, чем при упругом деформировании. Пластические деформации в прослойке отсутствуют в зоне застоя (на оси цилиндрического узла) и почти линейно увеличиваются, достигая максимальных значений (около 6,5 %) у внешней цилиндрической поверхности узла. Высокий уровень пластических деформаций свидетельствует о целесообразности использования термического нагружения при диффузионной сварке разнородных материалов с мягкими прослойками. Степень «мягкости» прослойки и ее влияние на напряженно-деформированное состояние узла при пластическом деформировании определяется главным образом ее прочностью (пределом текучести) и практически не зависит от ее жесткости (модуля упругости). Библиогр. 8, рис. 10.

Ключевые слова: сварные и паяные узлы, мягкая прослойка, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, термическое нагружение

В современной технике все более широкое применение находят пайка и диффузионная сварка, они позволяют получать узлы из разнородных материалов, которые нельзя соединить сваркой плавлением. Одной из проблем в таких узлах является их прочность при силовом и термическом нагружении.

Напряженное состояние и работа соединений с прослойками, в частности, с мягкой прослойкой, исследовались в работах [1, 2] аналитическими методами, которые не позволяют учесть все факторы влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС).

В данной работе использован программный комплекс ANSYS, основанный на методе конечных элементов (КЭ), который позволяет учесть конструктивные и технологические факторы, особенности материалов, виды нагружения и другие, а также установить основные закономерности образования НДС [3, 4].

В работе [5] установлено, что в соединениях с мягкой прослойкой при действии осевой нагрузки на образующей узла и непосредственно вблизи стыка формируется объемное напряженное состояние, при котором возможно разупрочнение более прочного и упрочнение менее прочного металла, что влияет на работоспособность соединения.

При охлаждении после сварки и при изменении температуры во время работы узла возможен такой же эффект. Учитывая, что формирование НДС в узлах с прослойкой изучено мало и имеет важное значение не только для формирования соединений, но и их работоспособности, данная работа является актуальной.

Целью настоящей работы было исследование НДС сварных и паяных узлов из разнородных материалов, в частности, разнородных сталей с мягкой прослойкой на основе меди при термическом нагружении изменением температуры с учетом пластического деформирования материала прослойки, которое определяли по условию пластичности Мизеса.

Исследование выполнялось на узлах цилиндр-цилиндр (Ц-Ц) из материалов одинаковой жесткости и прочности с прослойками меньшей прочности. Размеры узла: общая высота $2h = 40$ мм, диаметр $d = 20$ мм и толщина прослойки $s = 0,05$ мм (рис. 1).

Соединяемые материалы при этом имели отличающиеся температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР), равные $20 \cdot 10^{-6}$ и $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град в материалах 1 и 2, а материал прослойки 3 — среднее значение ТКЛР, равное $15 \cdot 10^{-6}$ 1/град (табл. 1).

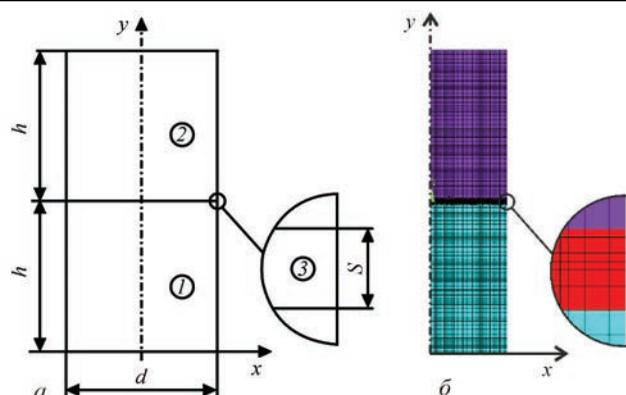


Рис. 1. Физическая (а) и КЭ (б) модели узлов типа Ц-Ц с прослойкой (1, 2 — соответственно материалы 1, 2; 3 — прослойка)

Как видно из табл. 1, в вариантах 1' и 2' соединяются материалы, имеющие одинаковые модули упругости и пределы текучести, но соединение выполняется через «мягкую» прослойку, имеющую меньший предел текучести, чем соединяемые материалы и меньший (вариант 1') или такой же (вариант 2') модуль упругости. Величины пределов текучести основных материалов и прослойки в этом варианте подбирались так, чтобы пластически деформировался только материал прослойки, а основной материал деформировался только упруго. Коэффициент упрочнения при пластическом деформировании материала прослойки принят равным $1 \cdot 10^3$ МПа для варианта 1' и $2 \cdot 10^3$ МПа для варианта 2'. Сравнение вариантов позволяет выделить влияние именно пластической составляющей деформаций на НДС узла.

Нагружение выполнялось снижением температуры узла на 100 град после образования соединения, при котором НДС создается за счет разных ТКЛР соединяемых материалов. При смене охлаждения нагревом на 100 град уровень напряжений и деформаций не изменяется, а знаки меняются на обратные.

Результаты сравнивались с подобными узлами (прослойки с малой и средней жесткостью) при упругом деформировании (варианты 1, 2), рассмотренными в работе [6].

Анализ полей и эпюр всех составляющих напряжений в узлах и их сравнение с результатами моделирования НДС аналогичных узлов с про-

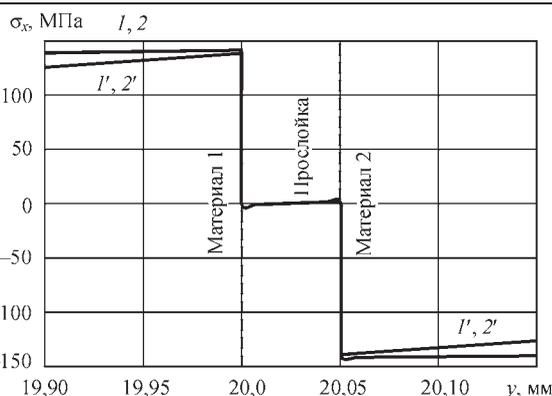


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений по оси цилиндра вблизи стыка (варианты 1, 2, 1' и 2')

слойкой при работе в упругой стадии (варианты 1 и 2) показали, что НДС в соединяемых материалах вблизи стыка и в прослойке имеет сложный объемный характер, с неравномерным распределением по сечению узла как в упругом, так и пластическом вариантах, но уровень напряжений на большей части стыка за счет пластических деформаций снижается.

Характер распределения радиальных σ_x и окружных σ_z напряжений в узле при наличии пластических деформаций в целом сохраняется, но изменяется их величина. Максимальных значений в соединяемых материалах они достигают вблизи плоскости стыка (на границах раздела с прослойкой) в средней его части, но более резко, чем при чисто упругом деформировании, уменьшаются по мере удаления от стыка (рис. 2). Вдоль стыка в основном металле (рис. 3, а, б) радиальные напряжения при наличии пластических деформаций в прослойке распределены более неравномерно, быстро уменьшаясь от максимума на оси узла до минимума вблизи кромки и снова резко возрастают на самой кромке.

Вдоль стыков внутри прослойки характер распределения радиальных напряжений более равномерный, на большей части стыка они небольшие (не превышают 5 МПа) и заметно возрастают (до 90 МПа) вблизи внешней цилиндрической поверхности узла (рис. 3, в, г). При этом характер и уровень напряжений в материалах 1, 2 и прослойки на стыках с ними отличаются только знаком.

Таблица 1. Варианты сочетаний свойств материалов (модулей упругости E , пределов текучести σ_T и ТКЛР α в узлах)

Номер варианта	Материал 1			Материал 2			Прослойка		
	E , 10^5 МПа	σ_T , МПа	α , $10^{-6} \cdot 1/\text{град}$	E , 10^5 МПа	σ_T , МПа	α , $10^{-6} \cdot 1/\text{град}$	E , 10^5 МПа	σ_T , МПа	α , $10^{-6} \cdot 1/\text{град}$
1	2,0	-	20,0	2,0	-	10,0	1,0	-	15,0
2	2,0	-	20,0	2,0	-	10,0	2,0	-	15,0
1'	2,0	200,0	20,0	2,0	200,0	10,0	1,0	38,0	15,0
2'	2,0	200,0	20,0	2,0	200,0	10,0	2,0	38,0	15,0

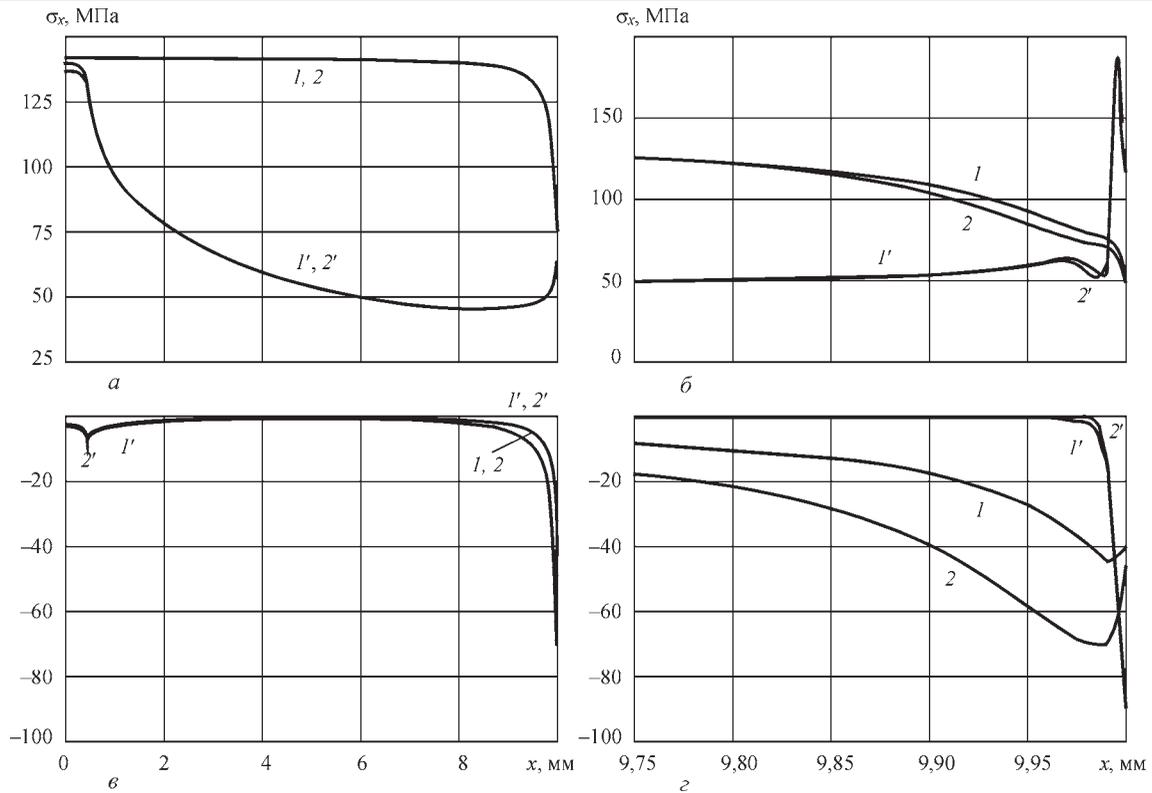


Рис. 3. Эпюры радиальных напряжений σ_x в металле 1 ($a, б$) и прослойке ($в, г$) по всему стыку ($a, в$) и вблизи наружной кромки ($б, г$) узлов (варианты $1, 2, 1'$ и $2'$)

Максимальные осевые напряжения σ_y , также, как и в упругой стадии работы, сосредоточены

вблизи стыка в непосредственной близости от внешней поверхности цилиндра и убывают по мере удаления от них (рис. 4, 5). При этом характер и уровень напряжений в материалах 1 и 2 также отличаются только знаком. На большей части стыка и боковой поверхности осевые напряжения заметно ниже, чем в упругой стадии работы.

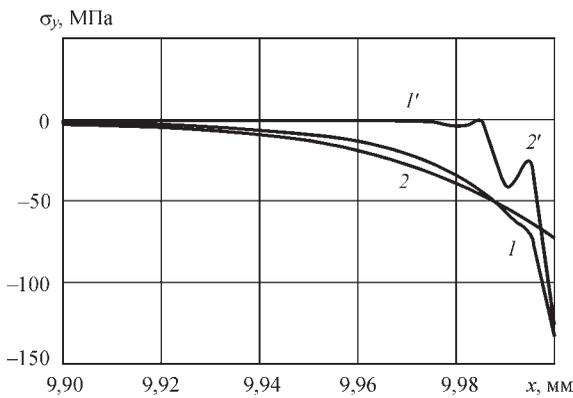


Рис. 4. Эпюры осевых σ_y напряжений по стыку основного металла 1 и прослойки вблизи наружной кромки (варианты $1, 2, 1', 2'$)

Касательные напряжения сосредоточены вблизи прослойки, при этом наибольшую величину они имеют на границах раздела прослойки и основных материалов. Они незначительно возрастают на большей части длины стыка, в меньшей степени, чем в упругой стадии деформирования, достигая максимума у самой кромки стыка (рис. 6). Максимальные касательные напряжения при наличии мягкой прослойки (с малым пределом текучести) в обоих

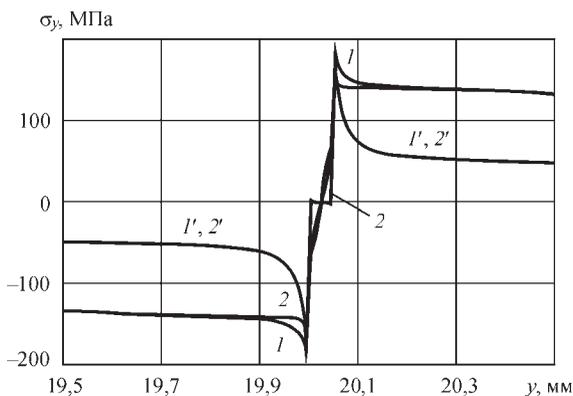


Рис. 5. Эпюры осевых напряжений по образующей цилиндра вблизи прослойки (варианты $1, 2, 1'$ и $2'$)

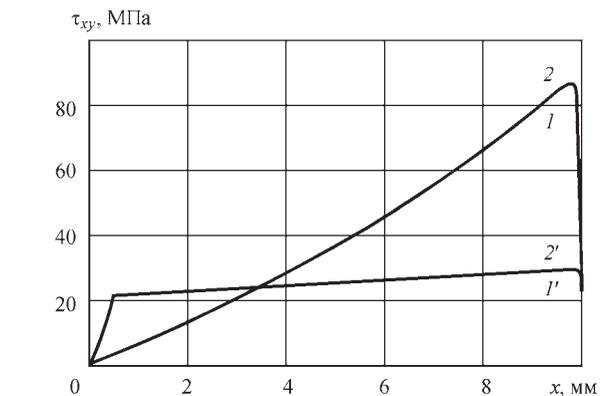


Рис. 6. Эпюры касательных τ_{xy} напряжений по стыку основного металла и прослойки (варианты $1, 2, 1', 2'$)

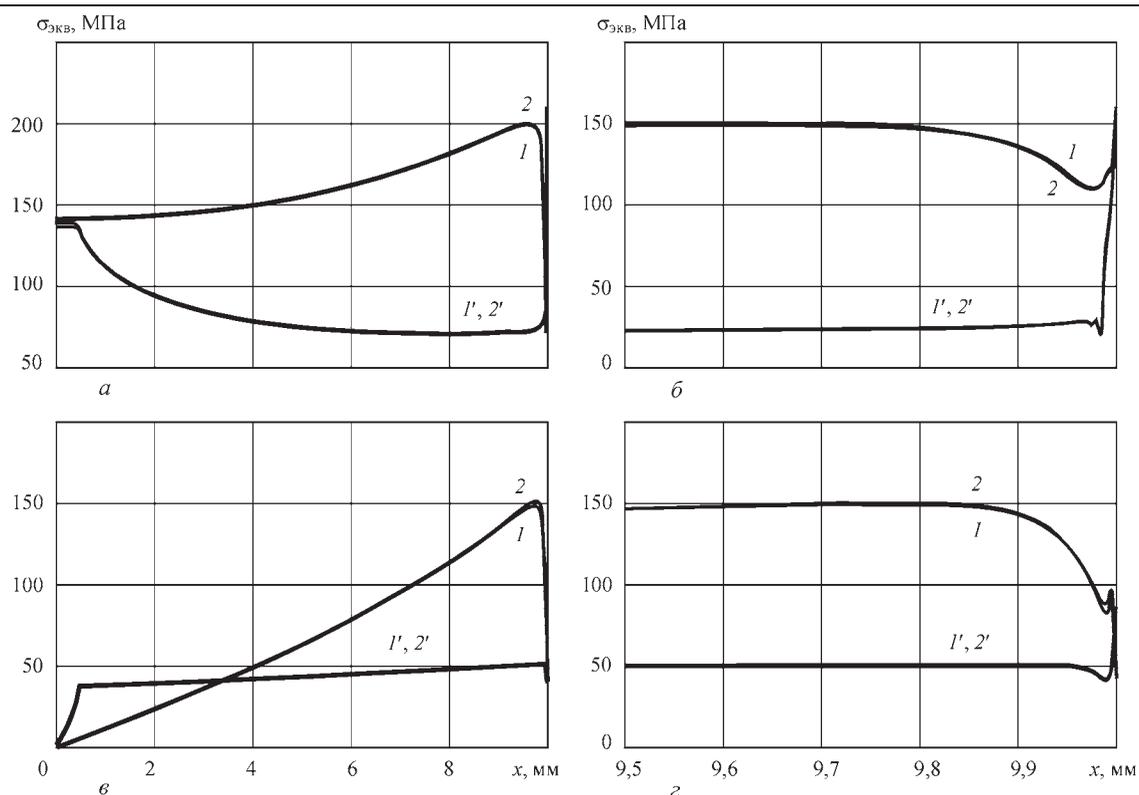


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в основном металле (а, б) и в прослойке (в, з) по всему стыку (а, в) и вблизи его наружной кромки (б, з) (варианты 1, 2, 1' и 2')

материалах и узлах снижаются одинаково, вне зависимости от жесткости прослойки. На границах раздела обоих материалов и прослойки зависимость отличается только знаком напряжений.

Максимальные эквивалентные напряжения, как и все составляющие, сосредоточены вблизи стыков, т. е. границ разделов материалов 1, 2 и прослойки. При этом в соединяемых материалах, в отличие от упругой стадии, они уменьшаются по мере удаления от оси узла до двух раз и только у самой кромки стыка резко возрастают до 200 МПа (рис. 7, а, б).

В прослойке эквивалентные напряжения значительно ниже, чем в упругой стадии работы, несколько превышают предел текучести материала прослойки за счет упрочнения при пластическом

деформировании и распределены практически равномерно вдоль всего стыка (рис. 7, в, з).

Пластические деформации в прослойке вдоль стыка распределены неравномерно, практически одинаково в вариантах 1' и 2' с прослойкой разной жесткости (рис. 8). Они отсутствуют в «зоне застоя» [7] на оси цилиндрического узла и постепенно увеличиваются по мере приближения к образующей поверхности цилиндра, достигая максимальных значений (6,5 %). Высокий уровень пластических деформаций свидетельствуют о целесообразности использования термического нагружения при диффузионной сварке с мягкими прослойками.

Наиболее полное и наглядное представление об изменении уровня максимальных значений всех составляющих напряжений в материалах узлов при наличии мягкой прослойки с учетом пластических деформаций в ней (вар. 1' и 2') и сравнение с упругой стадией работы (вар. 1 и 2) узлов с прослойкой малой (вар. 1 и 1') и нормальной (вар. 2 и 2') жесткости дают диаграммы на рис. 9 и 10.

Максимальные радиальные напряжения при наличии мягкой прослойки (вар. 1' и 2') увеличиваются в обоих соединяемых материалах, при этом несколько больше в варианте 2', т. е. в узлах с прослойкой, у которой «мягкость» определяется только меньшим пределом текучести при одинаковом с основным металлом модулем упругости (рис. 9).

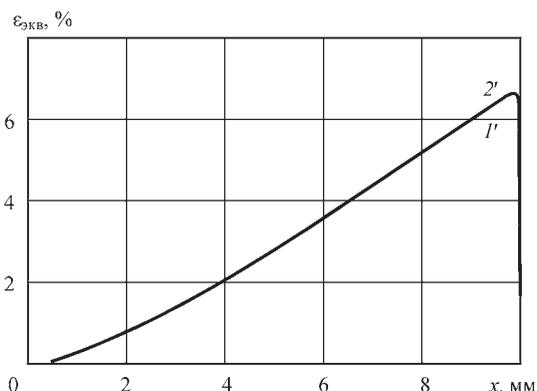


Рис. 8. Эпюры пластических деформаций в прослойке на стыках с соединяемыми материалами (варианты 1' и 2')

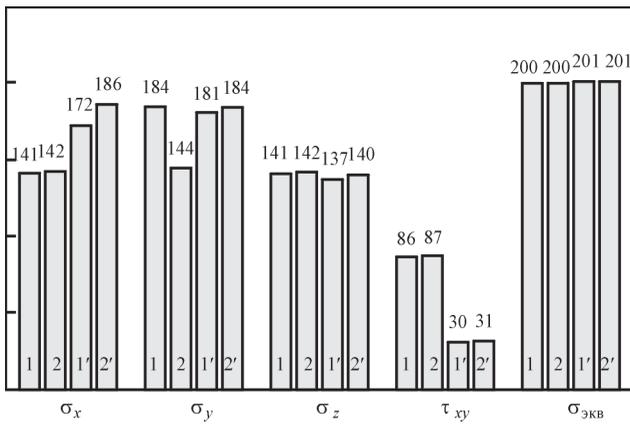


Рис. 9. Максимальные (по модулю) напряжения (МПа) в материалах 1 и 2 узлов Ц-Ц (варианты 1, 2, 1' и 2')

Максимальные осевые напряжения при наличии «мягкой» прослойки (вар. 1' и 2'), в отличие от узлов с прослойкой малой жесткости в упругой стадии (вар. 2), остаются практически такими же, как и в узлах с прослойкой нормальной жесткости в упругой стадии нагружения (вар. 1'), т. е. в данном случае эффекты от снижения жесткости и прочности материала прослойки отличаются [8].

Максимальные окружные напряжения в обоих вариантах мягкой прослойки остаются практически такими же, как и в упругой стадии нагружения, т. е. возникающие в прослойке пластические деформации мало влияют на их величину.

Наиболее заметно (более, чем в 2 раза) снижаются максимальные касательные напряжения при наличии мягкой прослойки (вар. 1' и 2'), при этом в одинаковой степени в обоих вариантах узлов.

Несмотря на изменение максимальных значений отдельных составляющих напряжений, максимальные эквивалентные напряжения в основном металле остаются практически на том же уровне, что и при нагружении узла в упругой стадии.

В прослойке картина иная (рис. 10). Пластические деформации заметно изменяют как отдельные составляющие, так и эквивалентные напряжения, но при этом изменение модуля упругости (жесткости) прослойки практически не влияет на уровень максимальных напряжений.

Радиальные напряжения при наличии пластических деформаций увеличиваются до двух раз по сравнению с упругим деформированием узлов с прослойкой малой жесткости (вар. 1) и на 30 % по сравнению с узлами с прослойкой нормальной жесткости (вар. 2).

Осевые напряжения, напротив, при пластическом деформировании прослойки заметно возрастают только по сравнению с вариантом упругого деформирования прослойки нормальной жесткости (вар. 2) и незначительно по сравнению с прослойкой малой жесткости (вар. 1). При этом

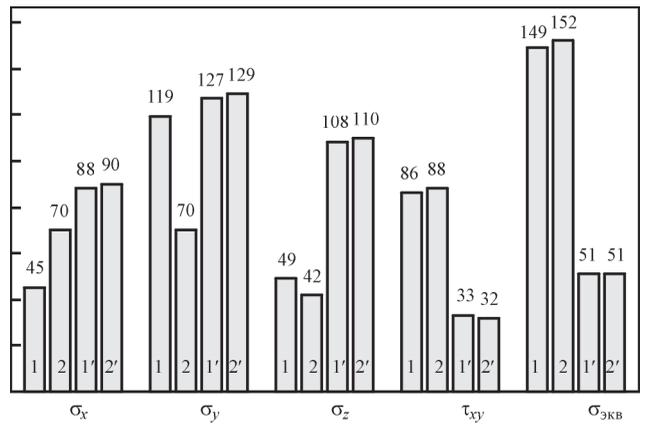


Рис. 10. Максимальные (по модулю) напряжения (МПа) в прослойке узлов Ц-Ц (варианты 1, 2, 1' и 2')

уровень этих напряжений при пластическом деформировании практически не зависит от жесткости прослойки (вар. 1' и 2').

Окружные напряжения в мягкой (малой прочности) прослойке заметно возрастают по сравнению с упругой стадией нагружения (более, чем в 2 раза), практически одинаково вне зависимости от жесткости (модуля упругости) прослойки.

Касательные напряжения в пластически деформирующейся мягкой прослойке (вар. 1' и 2'), напротив, значительно (более, чем в 2 раза), ниже, чем в упругой стадии работы как при нормальной (вар. 2'), так и малой (вар. 1') ее жесткости.

В результате пластического деформирования материала прослойки существенно (до трех раз) снижаются и эквивалентные напряжения в ней, при этом их уровень также не зависит от модуля упругости прослойки.

Выводы

1. При термическом нагружении в условиях мгновенной пластичности в узлах с «мягкой» прослойкой, имеющей меньший предел текучести, чем основной металл, аналогично узлам с прослойкой с меньшим модулем упругости в упругой задаче, НДС в узлах вблизи стыков имеет сложный объемный характер, с неравномерным распределением по сечению узла как в упругом, так и пластическом вариантах.

2. В рассматриваемых вариантах, при смене охлаждения на нагрев, все составляющие напряжений в соединяемых материалах меняют только знак, а эквивалентные напряжения полностью одинаковы. При этом их уровень на большей части узла как в соединяемых материалах, так и в прослойке, за счет пластических деформаций снижается и практически не зависит от модуля упругости.

3. Компьютерное моделирование НДС показало, что основные закономерности, установ-

ленные для упругой стадии деформирования, сохраняются.

4. Пластические деформации в прослойке вдоль стыка распределены неравномерно и не зависят от ее модуля упругости. На оси узла они образуют зону застоя и увеличиваются по мере удаления от нее, достигая максимальных значений (около 6,5 %) у внешней цилиндрической поверхности узла, что свидетельствует о целесообразности использования термического нагружения при диффузионной сварке с мягкими прослойками, т. е. диффузионной сварке с термоциклированием.

5. Степень «мягкости» прослойки и ее влияние на НДС узла при пластическом деформировании определяется главным образом ее пределом текучести и практически не зависит от ее модуля упругости, что необходимо учитывать при выборе материала прослойки или припоя.

Список литературы

1. Бакши О.А., Качанов Л.М. (1965) О напряженном состоянии пластичной прослойки при осимметричной деформации. *Изв. АН СССР. Механика*, **2**, 134–137.
2. Бакши О.А., Шрон Р.З. (1971) О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой. *Сварочное производство*, **3**, 3–5.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. (2004) *ANSYS для инженеров. Справ. пособие*. Москва, Машиностроение-1.
4. Басов К.А. (2005) *ANSYS. Справочник пользователя*. Москва, ДМК Пресс.
5. Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Chunlin Dong и др. (2018) Напряженное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке. *Автоматическая сварка*, **4**, 7–13.

6. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. (2017) *Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости*. Николаев, НУК.
7. Махненко В.И., Квасницкий В.В. (2009) Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой. *Автоматическая сварка*, **8**, 11–16.
8. Ermolaev G.V., Martynenko V.A., Olekseenko S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, **49**, **3**, 422–428.

References

1. Bakshi, O.A., Kachanov, L.M. (1965) On stressed state of plastic interlayer under axisymmetric deformation. *Izv. AN SSSR, Mekhanika*, **2**, 134–137 [in Russian].
2. Bakshi, O.A., Shron, R.Z. (1971) On calculated evaluation of strength of welded joints with soft interlayer. *Svaroch. Proizvodstvo*, **3**, 3–5 [in Russian].
3. Chigarev, A.V., Kravchuk, A.S., Smalyuk, A.F. (2004) *ANSYS for engineers: Reference book*. Moscow, Mashinostroenie-1 [in Russian].
4. Basov, K.A. (2005) *ANSYS: User directory*. Moscow, DMK Press [in Russian].
5. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Dong Chunlin et al. (2018) Stressed state of welded and brazed assemblies from similar materials with a soft interlayer under axial loading. *The Paton Welding J.*, **4**, 6–10.
6. Kvasnytskyi, V.V., Yermolayev, H.V., Matviienko, M.V. (2017) *Mechanics of bonds in diffusion welding, soldering and spraying of dissimilar materials under elasticity conditions*. In: Monography. Nikolaev, NUK [in Russian].
7. Makhnenko, V.I., Kvasnitsky, V.V. (2009) Peculiarities of formation of stress-strain state in diffusion bonds between dissimilar materials. *The Paton Welding J.*, **8**, 7–11.
8. Ermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, **49**(3), 422–428.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗВАРНИХ ТА ПАЯНИХ ВУЗЛІВ З РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ ПРИ ТЕРМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В.В. Квасницький¹, В.Ф. Квасницький², М.В. Матвієнко², Є.А. Бутурля², Г.В. Єрмолаєв²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Національний університет кораблебудування. 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів використовували для дослідження напружено-деформованого стану в з'єднаннях однорідних матеріалів при осьовому навантаженні. Дослідження виконані з урахуванням пластичних деформацій в м'яких прошарках, які зазвичай використовують при дифузійному зварюванні для активації поверхонь і зменшення залишкових напружень, а при паянні проміжним прошарком є паяний шов, що відрізняється від основного металу за фізико-механічними властивостями. Показано, що уздовж стику як в металах, що з'єднуються, так і в прошарку, еквівалентні напруження розподілені більш рівномірно, ніж при пружному деформуванні. Пластичні деформації в прошарку відсутні в зоні застою (на осі циліндричного вузла) і майже лінійно збільшуються, досягаючи максимальних значень (близько 6,5 %) біля зовнішньої циліндричної поверхні вузла. Високий рівень пластичних деформацій свідчить про доцільність використання термічного навантаження при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів з м'якими прошарками. Ступінь «м'якості» прошарку і його вплив на напружено-деформований стан вузла при пластичному деформуванні визначається головним чином і його міцністю (межею плинності) і практично не залежить від його жорсткості (модуля пружності). Бібліогр. 8, рис. 10.

Ключові слова: зварні та паяні вузли, м'який прошарок, комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан, термічне навантаження

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ $ZrB_2-SiC-AlN$ НА ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА C/C-SiC

Ю.С. Борисов¹, А.Л. Борисова¹, А.П. Грищенко¹, Н.В. Вигилянская¹,
М.В. Коломыцев¹, М.А. Васильковская²

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

²ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины. 03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3

Исследован процесс формирования на поверхности композиционного материала C/C-SiC защитного плазменного покрытия $ZrB_2-SiC-AlN$. Нанесение покрытия было проведено с использованием дозвуковой Ar/N_2 -плазменной струи и сверхзвуковой струи воздушно-газового плазматрона. Установлена роль межфазных явлений, протекающих в процессе плазменного напыления в объеме частиц композиционного порошка $ZrB_2-SiC-AlN$, в формировании слоя покрытия. Показано, что состав и скорость напыляющей плазменной струи оказывают влияние на структуру и фазовый состав образующегося $ZrB_2-SiC-AlN$ -покрытия. Проведено испытание стойкости полученных покрытий к термоциклическому нагреву струей пламени кислород-пропан-бутановой горелки. Покрытие толщиной 400 мкм показало сохранение защитных свойств после 15 термоциклов. Изучено влияние термоциклического нагрева на формирование в результате процесса окисления в защитном покрытии трехзонной структуры, строение и фазовый состав которой были исследованы методами РСФА и РСМА. Установлено, что поверхностный слой покрытия после термоциклического нагрева состоит из матрицы на основе Al_2SiO_5 с субмикронными включениями ZrO_2 . Библиогр. 25, табл. 3, рис. 9.

Ключевые слова: плазменное напыление, защитное покрытие, композиционный материал, ультравысокотемпературная керамика, микроструктура, фазовый состав, межфазное взаимодействие, оксидные микровключения

Композиционные материалы (КМ), состоящие из углеродной матрицы, упрочненной волокнами углерода или карбида кремния (C/C, C/SiC, C/C-SiC), обладают целым рядом высоких эксплуатационных характеристик благодаря сочетанию высокотемпературной прочности, высокой теплопроводности, низким значениям КТР, сопротивлением термоударам и абляционному изнашиванию. Это обусловило интерес к практическому применению их, в том числе в аэрокосмической промышленности при изготовлении деталей ракет и космических аппаратов [1–5]. Недостаток этих материалов состоит в невысоких значениях жаростойкости, которая ограничивает их использование при температурах выше 500 °С, и сопротивления эрозионному износу при высоких температурах.

В связи с этим актуальным является разработка составов и технологий нанесения на КМ C/C и C/C-SiC покрытий, обеспечивающих надежную работу изделий и узлов авиакосмической техники в экстремальных условиях ее эксплуатации.

Эффективность службы и долговечность защитных покрытий на КМ C/C и C/C-SiC определяется степенью удовлетворения комплекса следующих требований:

- сопротивление коррозии в окислительной среде при нагреве до 2000 °С, в том числе в условиях циклических нагревов;

- стойкость к переменным термическим нагрузкам в режиме термоусталости и термошока;

- наличие термобарьерных свойств для защиты основы из КМ;

- стойкость к эрозионному изнашиванию (абляции) под действием высокотемпературной газовой струи;

- обеспечение необходимого уровня механических характеристик материала основы из КМ.

При реализации вышеуказанных требований способ и технология формирования защитных покрытий определённого состава должны обеспечивать управление как прочностью сцепления покрытия с основой из КМ (на границе раздела основа – покрытие), так и когезионной прочностью слоёв сформированного покрытия и продуктов его взаимодействия с окружающей средой, образующихся в условиях его эксплуатации.

В ряде обзорных статей рассмотрен накопленный в последнее время в РФ, Западной Европе, США и КНР опыт разработки как составов покрытий такого назначения, так и технологий их нанесения. Анализ данных обзоров показывает многообразие составов исследованных покрытий, охватывающее тугоплавкие оксиды (ZrO_2 , HfO_2), карбиды (TiC, TaC, ZrC, HfC), бориды (ZrB_2 , HfB_2 , TiB_2 , B_4C), силициды ($MoSi_2$, $TiSi_2$), нитриды (Si_3N_4 , BN), включая их комбинации, относящиеся к классу

ультравысокотемпературной керамики (УВТК) — ZrB_2-SiC , HfB_2-SiC и т. п. [6–10].

Перечень представленных способов и технологий нанесения покрытий для защиты КМ на основе углерода и результаты их применения включает:

- нанесение суспензий порошков компонентов покрытия с последующим отжигом;
- нанесение методом CVD слоев SiC , $SiC-ZrC-SiC$ и т. п.;
- плазменное напыление;
- пропитка полимером с последующим процессом пиролиза (PIP);
- золь-гель метод;
- термодиффузионное нанесение (например, силицирование C/C),

а также процессы, состоящие из комбинации этих технологий. Например, формирование на поверхности КМ C/C подслоя из SiC методом силицирования, с последующим нанесением слоя суспензии из ZrB_2-SiC и отжигом в инертной среде и получением верхнего слоя из SiC методом CVD. Однако применение комбинированных технологий CVD и нанесение суспензий связано с длительными (2...10 ч) процедурами термообработки в вакууме или защитной среде при 1000...1150 °C.

Метод плазменного напыления отличается от других отсутствием этапов высокотемпературной и длительной термической обработки, необходимых для формирования сил сцепления с поверхностью основы и внутренней когезионной прочности слоя покрытия. Немаловажным является возможность формирования при плазменном напылении слоев толщиной несколько миллиметров, что позволяет использовать ее для изготовления из напыляемых материалов отдельностоящих изделий.

Наиболее обширный комплекс исследований в области плазменного напыления покрытий на основе ZrB_2-SiC в камере с использованием вакуума, повышенного давления, инертной среды, был выполнен в Италии сотрудниками Rome University «La Sapienza» и Centro Sviluppo Materiali S.p.A [11–16]. Проведено исследование влияния отжига покрытий на воздухе при 1200, 1400, 1600 и 1800 °C в течение 10 ч на фазовый состав и окисление покрытий, влияние термообработки покрытий при 1800 °C в течение 160 и 1800 с на структуру и фазовый состав ZrB_2-SiC с изменением соотношения ZrB_2-SiC [11–17]. Одним из существенных результатов их исследований является установление эффективности проведения этапа «пассивирующего» отжига покрытия ZrB_2-SiC при 1100 °C в течение 6 ч, что позволяет повысить

стойкость покрытий к окислению при последующем нагреве до 1600 °C [13].

Эксперименты по нанесению покрытий на поверхность КМ C/C-SiC с использованием плазменного напыления в открытой среде (воздуха) были проведены в КНР с формированием двухслойных покрытий $Er_2SiO_8/LaMgAl_{11}O_{19}$ и $Yb_2SiO_5/LaMgAl_{11}O_{19}$, характеризующихся высокой стойкостью к окислению [18, 19].

Задача настоящей работы состояла в исследовании влияния термоциклического нагрева в среде воздуха на фазовое и структурное состояние плазменного покрытия из композиционного порошка (КП) $60ZrB_2-20SiC-20AlN$ (мас. %), напыленного на основу из КМ C/C-SiC методом атмосферного плазменного напыления.

Композиционная керамика на основе ZrB_2 указанного состава была разработана сотрудниками ИПМ НАНУ и был изучен процесс высокотемпературного окисления ее горячепрессованных образцов при температурах до 1650 °C в течение 5 ч [20].

Методы и материалы. Состав КП и технология его получения из механической смеси компонентов ZrB_2 , SiC , AlN методом гранулирования на связке из поливинилового спирта были разработаны ИПМ НАН Украины.

Исходные порошки ZrB_2 , SiC , AlN для получения КП имели чистоту около 99,5 % и размер

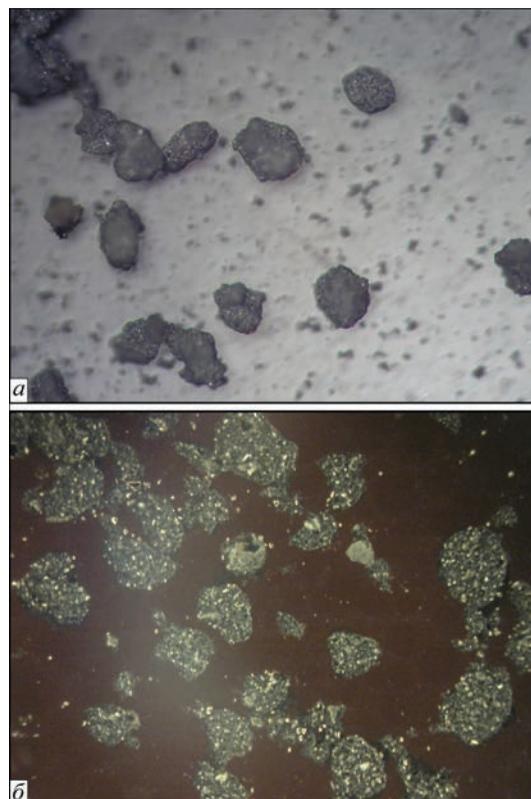


Рис. 1. Внешний вид порошка $60ZrB_2+20SiC+20AlN$ (мас. %) (а) и структура частиц в поляризованном свете (б)

частиц 0,5...1,0 мкм. Внешний вид и структура частиц порошка показаны на рис. 1, гистограмма распределения его гранулометрического состава на рис. 2.

В качестве подложки для напыления использовали пластину КМ С/С-SiC размером 20×20×5,7 мм. Перед операцией напыления проводили струйно-абразивную обработку ее поверхности.

Для нанесения покрытия в данной работе были использованы два метода плазменного напыления в открытой атмосфере (в среде воздуха), отличающиеся составом плазмообразующего газа (смесь Ar/N₂, воздух), мощностью плазмотрона (24 и 82 кВт, соответственно) и скоростями истечения плазменной струи (до- и сверхзвуковая), (ПН — дозвуковое Ar/N₂ плазменное напыление; СВГПН — сверхзвуковое воздушно-газовое плазменное напыление).

Использование программы компьютерного моделирования процесса плазменного напыления CASPSP [21] и имеющихся экспериментальных данных о скоростях частиц в условиях плазменного напыления при использовании аналогичных плазмообразующих газов [22] позволило произвести оценку скоростей частиц КП ZrB₂-SiC-AlN выбранного состава и продолжительности времени их пребывания в плазменной струе — τ_ч с учетом их диаметра — d и дистанции напыления — h.

Ускорение и нагрев напыляемой частицы под воздействием плазменной струи зависит от ее размеров и плотности. При переводе состава 60ZrB₂-20SiC-20AlN мас. % в об. % получаем КП 43ZrB₂-28,5SiC-28,5AlN (об. %) и объемная плотность такой композиции — 4,4 г/см³ (без учета наличия связующего).

В результате проведенных расчетов был установлен комплекс характеристик условий атмосферного плазменного напыления при дозвуковом и сверхзвуковом режиме истечения плазменной струи, использованных для нанесения покрытий:

– дозвуковой: плазмообразующий газ — Ar/N₂, T_{пл.} ~ 10000 °К, W_{пл.} ~ 600 м/с, W_ч ~ 100...130 м/с, τ_ч (d = 60 мкм, h = 100 мм) ~ 1,5 мс;

– сверхзвуковой: плазмообразующий газ — воздух, T_{пл.} ~ 6000 °К, W_{пл.} ~ 2500 м/с, W_ч ~ 300...350 м/с, τ_ч (d = 60 мкм, h = 180 мм) ~ 0,5 мс.

Расчетное время полного пребывания в объеме плазменной струи частиц КП ZrB₂-SiC-AlN с размером частиц 40...80 мкм в условиях дозвукового напыления составляет 0,5...3,0 мс, при сверхзвуковом — 0,2...1,5 мс.

Стойкость защитного покрытия на поверхности КП С/С-SiC к высокотемпературным циклическим нагрузкам является одним из наиболее важных его функциональных характеристик.

Термоциклический нагрев образца с покрытием толщиной 400 мкм проводили с помощью струи кислород-пропан-бутанового пламени горелки ГН-2. Температура пламени составляла порядка 2000 °С, расстояние от мундштука горелки до поверхности образца — 70...80 мм. В режиме циклического нагрева образец нагревался в течение 2 мин, достигая состояния красного свечения в течение 10 с, с последующим охлаждением на воздухе в течение около 10 мин перед очередным нагревом.

Внешний вид поверхности и сечение образца с покрытием ZrB₂-SiC-AlN, полученным методом СВГПН, после 15 циклов нагрева (рис. 3), свиде-

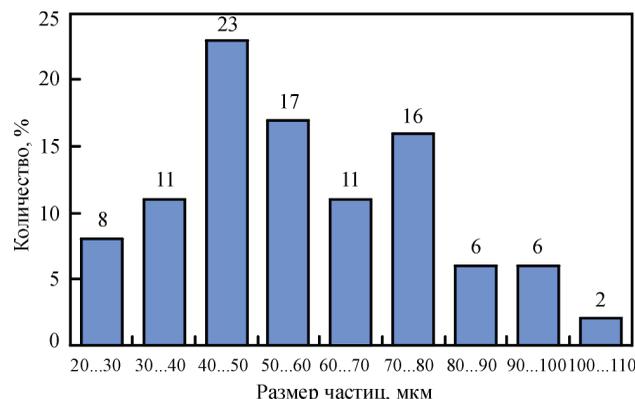


Рис. 2. Гистограмма распределения гранулометрического состава порошка 60ZrB₂+20SiC+20AlN (мас. %)

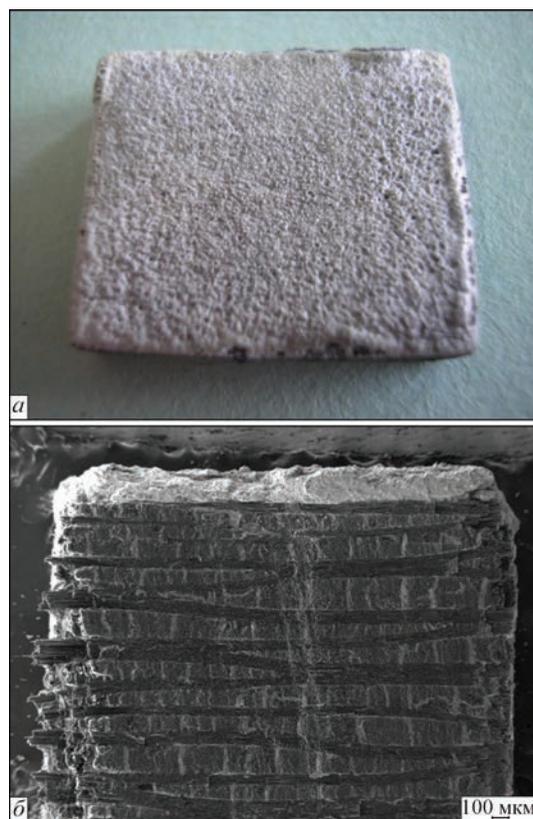


Рис. 3. Внешний вид поверхности (а) и сечение (б) образца с плазменным покрытием ZrB₂-SiC-AlN после 15 циклов нагрева

тельствуют об отсутствии признаков разрушения покрытия и сохранении его защитных свойств в условиях использованного режима испытания его термостойкости.

Результаты исследования. Микроструктура покрытия из КП $ZrB_2-SiC-AlN$, напыленного на КМ C/C-SiC (рис. 4), характеризуется гетерогенностью, высокой плотностью, отсутствием дефектов и отслоений на границе с основой.

В структуре покрытий можно различить чередующиеся участки светлой и более темной фаз (возможно смеси нескольких фаз), при этом на отдельных участках покрытий наблюдается ламелеобразная структура. Различие в структуре покрытий, полученных методами дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления, установлено при металлографическом исследовании, состоит в соотношении видимой площади светлой и темной фаз. В случае сверхзвукового напыления превалирует доля светлой фазы. Структура темной фазы носит стекловидный характер.

Результаты рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) напыленных покрытий (рис. 5) показали, что в процессе плазменного напыления происходит взаимодействие компонентов исходного порошка (рис. 5, а) с окружающей средой (воздухом) и между собой, в связи с чем в напыляемом материале образуются оксидные фазы. Так, в покрытии, полученном методом дозвукового плазменного напыления (рис. 5, б), это $ZrSiO_4$, Al_2SiO_5 и ZrO_2 (рис. 5, б). В случае использова-

ния метода сверхзвукового напыления (рис. 5, в) фаза $ZrSiO_4$ в напыленном исходном покрытии не обнаружена, однако на рентгенограмме в интервале углов $24...29^\circ$ наблюдается «галло», свидетельствующее о наличии в покрытии аморфной фазы (рис. 5, в), предположительно SiO_2 как продукта распада $ZrSiO_4$.

Сравнение интенсивности рентгеновских отражений ZrB_2 , SiC, AlN исходного порошка и покрытий свидетельствует о существенном снижении содержания ZrB_2 в результате его окисления при напылении.

Совместное рассмотрение результатов металлографии и РСФА исходных покрытий (рис. 4, 5), полученных с использованием различных методов плазменного напыления, позволяет сделать заключение о том, что количество оксидных фаз, наблюдаемых в покрытиях, полученных с применением дозвуковой плазменной струи, более значительно. Причиной этого по всей вероятности является меньшая скорость движения частиц и соответственно большее время пребывания частиц в зоне окисления.

По всей вероятности на шлифе оксидные фазы (ZrO_2 , Al_2SiO_5) выглядят окрашенными в темный цвет, а металлоподобные (ZrB_2 , SiC, AlN) — в светлый.

При рентгеноструктурном фазовом анализе покрытий после термоциклирования в поверхностном слое в обоих случаях (рис. 6, а, б) обнаружены только оксидные фазы: ZrO_2 (в виде те-

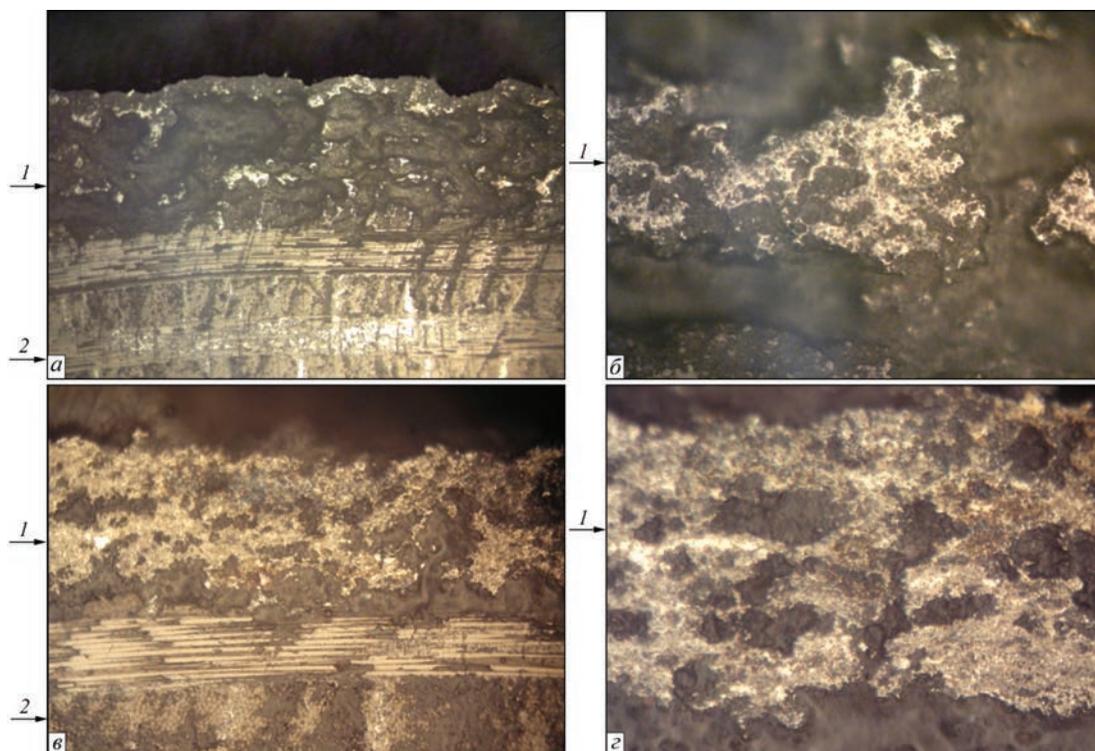


Рис. 4. Микроструктура плазменных покрытий из КП $60ZrB_2-20SiC-20AlN$ (мас. %), полученных методами дозвукового (а, б) и сверхзвукового (в, г) напыления: 1 — покрытие, 2 — основа C/C-SiC (а — $\times 100$; в — $\times 200$; б, г — $\times 400$)

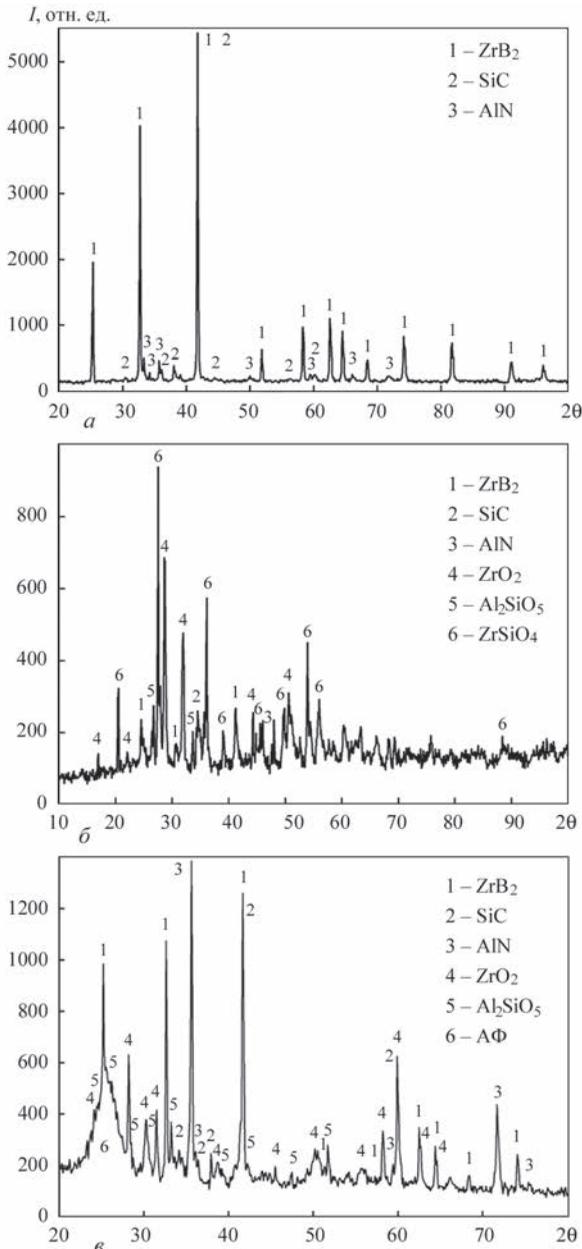


Рис. 5. Рентгенограммы исходного порошка (а) и покрытий, полученных методами дозвукового (ПН) (б) и сверхзвукового (СВГПН) (в) плазменного напыления

трагональной и моноклинной модификаций) и Al_2SiO_5 . Аморфная фаза, которая была обнаружена в исходном покрытии при СВГПН, в данном случае отсутствует.

Поскольку в поверхностном слое этих покрытий не были обнаружены компоненты исходного порошка (ZrB_2 , SiC, AlN), был проведен анализ отделенного от основы и измельченного СВГПН-покрытия (рис. 6, в), в котором все три фазы были обнаружены, хотя и в меньшем количестве, чем в исходном покрытии (рис. 5, в).

Исследование химического состава отдельных структурных составляющих покрытий в исходном состоянии и после термоциклирования проведено с привлечением метода сканирующей электрон-

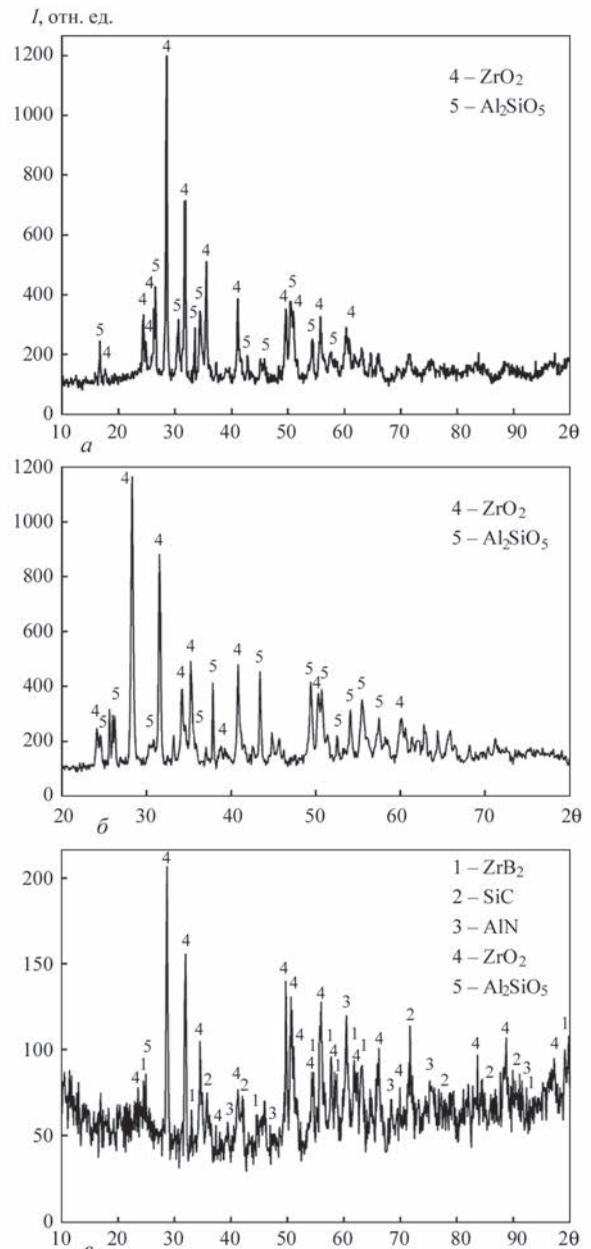


Рис. 6. Рентгенограммы плазменных покрытий из КП $60ZrB_2-20SiC-20AlN$ (мас. %) на поверхности КМ C/C-SiC после термоциклирования: а — ПН-покрытие, поверхностный слой; б — СВГПН-покрытие, поверхностный слой; в — СВГПН-покрытие, состав, усредненный по всей толщине

ной микроскопии совместно с рентгеноспектральным микроанализом (РСМА) (рис. 7, 8). При этом анализировали как поверхностный слой покрытий, так и поперечный срез по всей его толщине. Содержание элементов, входящих в состав КП (В, С, N, Al, Si, Zr) и кислорода, было получено путем сканирования пяти-семи участков размером 50×50 мкм и усреднения по всей площади (рис. 8, б) поверхностного слоя покрытия или его сечения (рис. 7, б, табл. 1). Анализ состава структурных составляющих осуществляли локально с помощью электронного зонда размером 1, 5 мкм (табл. 2, 3).

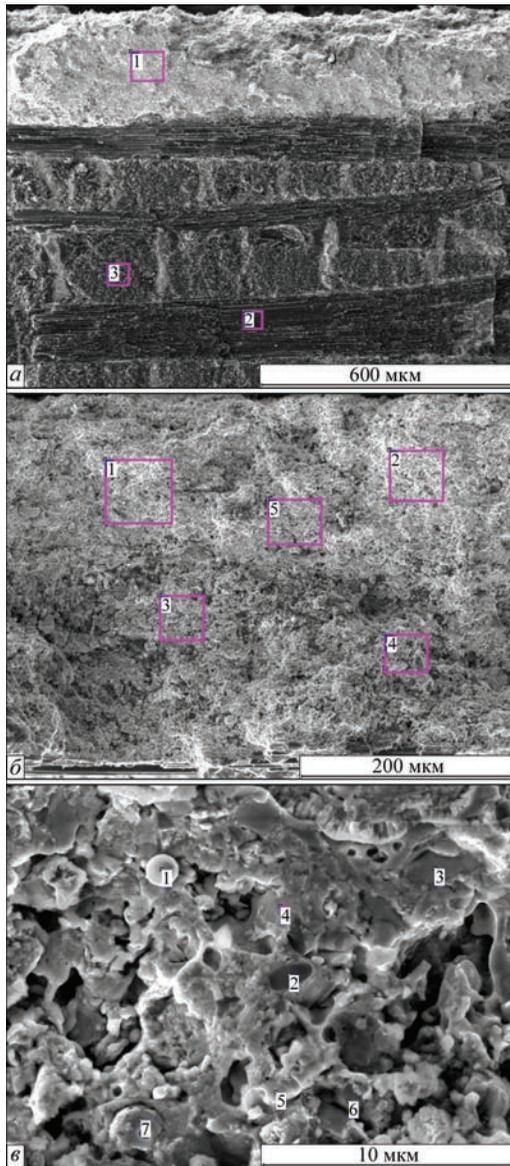


Рис. 7. Электронная микрофотография исходного плазменного СВГПН-покрытия из КП $ZrB_2-SiC-AlN$ на поверхности КМ C/C-SiC: а — сечение образца с плазменным покрытием (1 — покрытие; 2 — углеродное волокно; 3 — КМ C/C-SiC); б — сечение покрытия, общий вид; в — структурные элементы на изломе покрытия (расшифровка химического состава по спектрам 1, 2 и т. д. на рис. 7, б, в представлена в табл. 1, 2)

Таким образом установлено, что в процессе плазменного напыления в результате окисления частиц КП $ZrB_2-SiC-AlN$ относительное содержание Al, Si и Zr по сравнению с исходным

Таблица 1. Общее содержание элементов СВГПН-покрытия, мас. %

Элемент	Порошок	Покрытие в исходном состоянии ¹⁾	Покрытие после термоциклирования ²⁾
B	11,55	21,58±4,71	2,01
C	5,99	16,77±3,95	2,02
N	6,84	1,90±1,33	0,00
O	0,20	33,16±6,98	47,73
Al	15,16	6,25±1,36	19,28
Si	14,01	7,26±0,89	9,39
Zr	48,75	12,34±2,54	17,40

¹⁾ Усредненный состав по всей толщине (рис. 7, б, точки 1, 2–5).

²⁾ Состав поверхностного слоя, усредненный по площади 600×600 мкм (рис. 8, б, спектр 1).

порошком снижается, а содержание кислорода достигает порядка 30 мас. %. В результате термоциклирования фазы, содержащие B, C и N, на поверхности покрытия отсутствуют, а количество кислорода в поверхностном слое возрастает до 48 % (табл. 1). Локальный анализ химического состава плазменного покрытия после термоциклирования по его глубине показывает снижение содержания кислорода от 48 до 30 мас. % (спектры 1–4, рис. 8, а). Результаты РСМА (табл. 2, 3) с одной стороны полностью подтверждают результаты РСФА, а именно наличие в покрытиях оксидных фаз ZrO_2 , Al_2SiO_5 и $ZrSiO_4$, с другой позволяют предположить наличие также аморфизированных боросиликатных ($B_2O_3 \times SiO_2$) фаз. Установлено, что процесс термоциклирования вызывает структурные изменения поверхностного слоя на глубину (рис. 3, б и 8, а), размеры которой определяются температурным режимом, установившимся в объеме покрытия при его термоциклических нагревах.

Анализ полученных результатов. Формирование слоя защитного покрытия на поверхности КМ C/C-SiC происходит в условиях атмосферного плазменного напыления КП $60ZrB_2-20SiC-20AlN$ (мас. %).

Особенностью процесса плазменного напыления покрытий из КП $ZrB_2-SiC-AlN$ является формирование при нагреве в струе плазмы напыляемых частиц, состоящих из смеси расплавов ZrB_2 ,

Таблица 2. Содержание элементов (ат. %) в структурных составляющих исходного плазменного СВГПН-покрытия

Элемент	Номера спектра (рис. 7, в)						
	1	2	3	4	5	6	7
B	4,8	0,0	55,4	0,0	0,0	0,0	52,5
C	7,1	42,0	6,4	0,6	0,0	2,2	5,1
N	2,9	1,1	1,1	0,0	0,0	46,7	0,6
O	60,4	2,4	10,3	76,9	71,4	10,6	13,6
Al	0,5	0,9	0,1	2,7	14,8	38,8	0,3
Si	0,2	51,6	0,2	7,4	7,2	0,9	0,6
Zr	30,0	2,0	26,5	8,9	0,3	0,8	27,3
Основная фаза	ZrO_2	SiC	ZrB_2	$ZrSiO_4$	Al_2SiO_5	AlN	ZrB_2

Таблица 3. Содержание элементов (ат. %) в структурных составляющих СВГПН-покрытия после термоциклирования

Элемент	Номера спектра (рис. 8, <i>а</i>)								Номера спектра (рис. 8, <i>б</i>)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4
B	1,2	1,5	1,8	0,0	1,7	0,9	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6
C	0,7	0,7	0,5	0,4	1,8	2,8	2,1	0,9	1,6	0,6	4,3	3,7
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O	69,6	61,1	65,4	67,7	71,9	71,1	51,6	72,4	62,1	61,3	73,0	62,0
Al	21,7	24,4	26,6	26,6	3,7	3,6	21,0	10,6	27,0	21,6	0,2	0,6
Si	6,5	6,7	5,1	4,6	3,0	2,0	16,0	12,5	13,2	16,2	0,1	0,0
Zr	0,1	0,3	0,2	0,2	17,3	18,9	4,2	2,4	2,6	0,1	34,0	30,2
Основная фаза	Al ₂ SiO ₅				ZrO ₂		Смесь Al ₂ SiO ₅ и Al ₂ O ₃		Al ₂ SiO ₅		ZrO ₂	

SiC, AlN. Орданьян С.С. с сотрудниками, исследуя фазовую диаграмму ZrB₂-SiC, проводили нагрев смеси ZrB₂ и SiC до стадии совместного плавления при 2900 °С и не обнаружили при этом взаимодействия этих расплавов. С другой стороны в системе ZrB₂-SiC ими было установлено существование при 2270 °С эвтектик — 77 мол. % SiC [23]. Полагают, что ее наличие препятствует

явлению разложения SiC при нагреве, что обеспечивает совместное плавление ZrB₂ и SiC при плазменном напылении [15].

Факт перехода КП ZrB₂-SiC в условиях плазменного напыления в стадию плавления экспериментально установлен сотрудниками Rome University «La Sapienza» и Centro Sviluppo Materiali S.p.A [12]. Об этом свидетельствует вид полученных деформи-

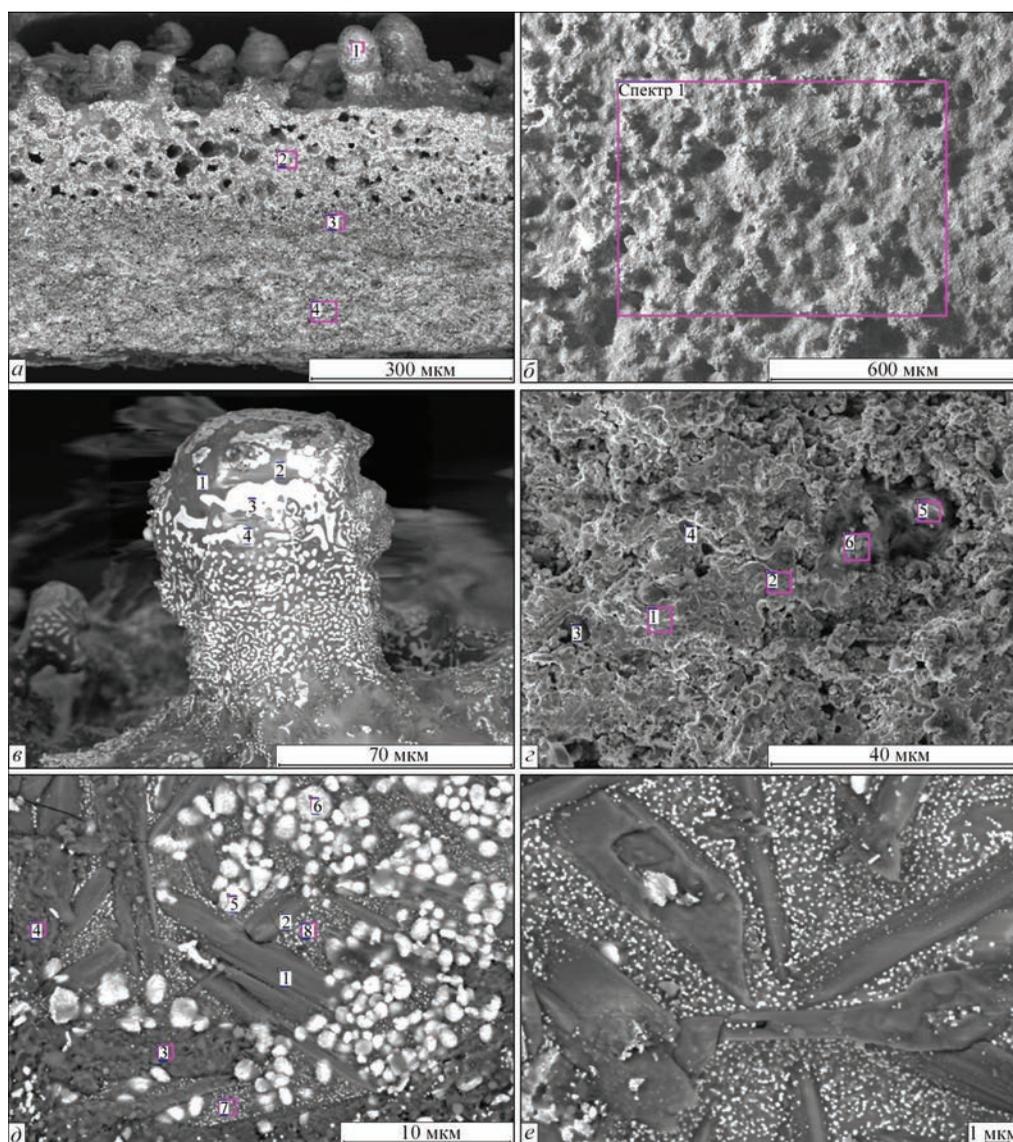


Рис. 8. Электронная микрофотография плазменных СВГПН-покрытий из КП ZrB₂-SiC-AlN на поверхности КМ С/С-SiC после термоциклирования: *а* — сечение образца с плазменным покрытием; *б* — общий вид поверхности покрытия; *в* — вырост на поверхности; *г* — сечение покрытия, общий вид; *д*, *е* — структурные элементы на поверхности покрытия

рованных частиц расплава — сплетов и влияние на них режимов плазменного напыления.

В связи с этим возможно утверждать, что формирование слоя покрытия из КП $ZrB_2-SiC-AlN$ при использованных условиях плазменного напыления осуществляется путем охлаждения и затвердевания на поверхности КМ $C/C-SiC$ частиц расплава смеси компонентов КП ZrB_2, SiC, AlN , прошедших стадии плавления и межфазного взаимодействия, в том числе с образованием продуктов окисления (ZrO_2, SiO_2, Al_2O_3).

Степень развития этого процесса в дисперсной среде плазменной струи зависит от размеров частиц напыляемого порошка, определяющих положение траектории их полета в объеме струи.

В период движения частиц напыляемого материала в условиях атмосферного плазменного напыления неизбежным является их взаимодействие с кислородом окружающей среды и образование продуктов их окисления, что, в частности, установлено и при нанесении покрытия из ZrB_2 [14].

При достижении частицами поверхности основы в результате действия напорного давления происходит деформация напыляемых частиц с образованием сплетов. Одновременно продолжается развитие окисления поверхности частиц, формирующих покрытие.

Размер сплетов, их толщина, определяющая скорость охлаждения их материала, связана с величиной напорного давления, которая определяется скоростью частицы и ее плотностью. Так, в случае использования метода плазменного дозвукового напыления для частиц КП $60ZrB_2-20SiC-20AlN$ размером 60 мкм напорное давление составляет 50...75 МПа, а при сверхзвуковом методе — 400...500 МПа. В обоих случаях это превышает показатели, используемые в технологии горячего прессования УВТК аналогичного состава (48 МПа) [20].

Таким образом, рассмотренные выше обстоятельства формирования покрытия из КП УВТК $ZrB_2-SiC-AlN$ при плазменном напылении в открытой атмосфере с использованием операции предварительного нагрева напыляемой поверхности КМ $C/C-SiC$ показывают, что процесс происходит путем скоростного нагрева частиц на начальном участке плазменной струи до полного плавления материала всех компонентов с образованием частиц из смеси расплавов ZrB_2, SiC и AlN , не взаимодействующих друг с другом. На этапе движения этих частиц в объеме плазменной струи с переменными значениями ее температур, скоростей и состава среды развиваются процессы межфазного взаимодействия поверхности частицы с окружающей кислородсодержащей средой.

В результате этого происходит образование продуктов окисления, рециркуляция этих продуктов в объеме частицы, что создает возможность их межфазного взаимодействия с образованием сложных соединений. Наличие силикатных фаз Al_2SiO_5 и $ZrSiO_4$ в структуре исходного покрытия свидетельствует о протекании в объеме напыляемых частиц на стадии движения в плазменной струе как процессов окисления при взаимодействии с внешней средой, так и межфазных явлений в объеме с синтезом муллитных фаз и циркона.

Описанная схема процесса формирования состава и структуры исходного плазменного покрытия подтверждается данными РСФА напыляемого порошка и покрытия (рис. 5). Отсутствие борсодержащих фаз по-видимому связано с температурным режимом нагрева частиц, способствующим переходу B_2O_3 в газовую или аморфную фазу. Выявленная аморфная фаза может быть связана также с появлением силикатной $Al-Si-O$ -фазы.

В процессе циклических нагревов поверхности покрытия в его объеме формируется поле температур, связанное с режимом нагревов, мощностью теплового источника, теплофизическими свойствами покрытия и основы, размерами образца и покрытия. Характер распределения температур определяет развитие фазовых превращений по толщине покрытия.

Покрытие, представленное на рис. 8, а, состоит из трех зон. Образование пор в верхней части слоя покрытия (рис. 8, а) связано с температурными полями, сформировавшимися в объеме покрытия при проведении процесса термоциклирования. Причиной возникновения пор является изменение объема материала покрытия, происходящее при окислении ZrB_2 по реакции $ZrB_2 + 2,5O_2 = ZrO_2 + B_2O_3$. При этом переход объема г/моля ZrB_2 18,3 см³ в смесь продуктов реакции окисления ZrO_2 и B_2O_3 с объемами г/моля ZrO_2 22,4 см³ и г/моля B_2O_3 38 см³ приводит к увеличению исходного объема компонента ZrB_2 до 60,4 см³, или в 3,3 раза. В дальнейшем при нагреве покрытия до 1100 °С происходит активное испарение B_2O_3 и образование пористой структуры этого слоя. Толщина пористого участка слоя покрытия составляет приблизительно 150 мкм, что очевидно связано с величиной глубины его прогрева при термоциклировании до порядка 1100 °С. Пары B_2O_3 выходят из покрытия, образуя каналы (рис. 8, в) и увлекая за собой материал алюмосиликатного расплава — Al_2SiO_5 с появлением наростов на поверхности (рис. 8, в).

Исследование тонкой структуры поверхности и сечения покрытия (рис. 8, д, табл. 3) показало наличие высокодисперсных (0,1...2,0 мкм) вклю-

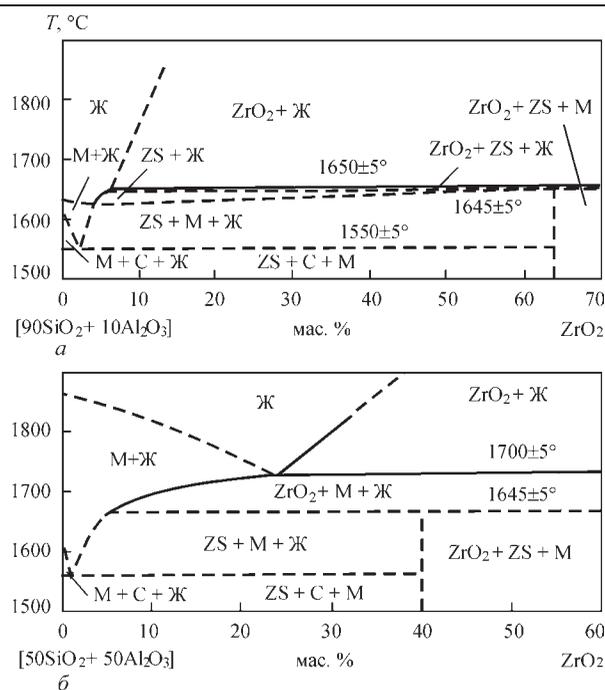


Рис. 9. Диаграммы состояния нескольких сечений частной тройной системы $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ (по Квереси и Бретту) [26]: *a* — сечение $[\text{90SiO}_2+\text{10Al}_2\text{O}_3]\text{-ZrO}_2$; *b* — сечение $[\text{50SiO}_2+\text{50Al}_2\text{O}_3]\text{-ZrO}_2$; С — кристаболит; М — муллит чений фазы ZrO_2 в матричную фазу Al_2SiO_5 . Это может быть объяснено исходя из наличия квазибинарной системы фазового равновесия $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{-ZrO}_2$, где показан переход ZrO_2 в расплав Al_2SiO_5 [25] (рис. 9).

В связи с этим в течение процесса термоциклирования происходит выпадение более тугоплавкой фазы ZrO_2 из матрицы Al_2SiO_5 , имеющей температуру плавления 1850°C .

Наличие пористости и включений ZrO_2 должно способствовать снижению теплопроводности материала покрытия в этой зоне, что позволяет выполнять ему функциональную характеристику теплозащиты от внешнего теплового источника.

Состав второй низлежащей зоны покрытия толщиной около $100\ \mu\text{m}$ согласно результатам анализа содержит ZrO_2 , Al_2SiO_5 и B_2O_3 и имеет плотную структуру, что свидетельствует о формировании его в условиях температур ниже 1100°C . Наличие жидкой фазы B_2O_3 (возможно тройной алюмоборосиликатной фазы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{xSiO}_2\text{x}\text{B}_2\text{O}_3$), пропитывающей слой покрытия, обеспечивает плотность и защитные свойства [24].

Нижняя зона покрытия, прилегающая к поверхности основы — КМ C/C-SiC , толщиной около $150\ \mu\text{m}$ по составу соответствует покрытию в исходном напыленном состоянии, т. е. $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AIN}$ с оксидными включениями.

Таким образом, в данных условиях эксперимента с проведением термоциклического нагрева сформировано трехслойное покрытие, состо-

ящее из пористого внешнего слоя $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{-ZrO}_2$; плотного промежуточного, имеющего защитные свойства слоя $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{-ZrO}_2$, содержащего B_2O_3 , и слоя в контакте с основой C/C-SiC , состоящего из компонентов исходного плазменного покрытия — ZrB_2 , SiC , AlN с наличием продуктов их окисления.

Заключение. Формирование защитного покрытия на поверхности КМ C/C-SiC в условиях атмосферного (в открытой среде) плазменного напыления с использованием композиционного порошка (КП) $60\text{ZrB}_2\text{-}20\text{SiC}\text{-}20\text{AlN}$ (мас. %) происходит путем нагрева частиц КП при движении в объеме плазменной струи до стадии плавления при сопутствующих процессах их взаимодействия с окружающей средой и межфазных явлений в объеме композиционной $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AIN}$ -частицы с последующей их деформацией и укладкой на поверхности основы C/C-SiC под действием напорного давления.

Состав напыленного плазменного $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AIN}$ -покрытия зависит от степени нагрева частиц КП и развития межфазного взаимодействия их компонентов (ZrB_2 , SiC , AlN) как с высокотемпературной газовой средой (O_2 , N_2 , Ar), так и в объеме частиц между их компонентами. Время пребывания частиц КП в плазменной струе и динамика процессов их нагрева и ускорения обусловлены параметрами процесса плазменного напыления (состав и расход плазмообразующих газов, мощность плазмотрона, дистанция напыления).

Экспериментальная работа по атмосферному плазменному напылению покрытий из КП $60\text{ZrB}_2\text{-}20\text{SiC}\text{-}20\text{AlN}$ на поверхность КМ C/C-SiC была проведена с использованием дозвуковой плазменной струи, полученной при мощности плазмотрона $24\ \text{kВт}$ и плазмообразующем газе Ar/N_2 , и сверхзвуковой плазменной струи, формируемой при работе плазмотрона мощностью $82\ \text{kВт}$ с воздухом в качестве плазмообразующего газа.

Расчетно-теоретическая оценка основных характеристик процесса плазменного напыления покрытия из КП $60\text{ZrB}_2\text{-}20\text{SiC}\text{-}20\text{AlN}$ (мас. %), имеющего расчетную плотность материала частиц $4,4\ \text{г/см}^3$, таких, как температура и скорость плазменной струи, скорость частиц среднего диаметра ($60\ \mu\text{m}$), время их пребывания в плазменной струе была проведена с использованием программы компьютерного моделирования процесса плазменного напыления CASPSP. В случае параметров дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления, использованных при проведении экспериментов, приблизительные расчетные значения температуры плазменной струи составляли

10000 и 6000 °С, скорость струи — 600 и 2500 м/с, время пребывания напыляемых частиц в объеме струи — 0,5...3,0 и 0,2...1,5 мс, соответственно.

Расчетная величина напорного давления при ударе частицы об основу составила 45...75 и 400...500 МПа, соответственно.

Данные РСФА покрытий, полученных при атмосферном плазменном напылении, при сравнении с РСФА исходного КП 60ZrB₂-20SiC-20AlN свидетельствуют о появлении в покрытиях новых фаз-продуктов взаимодействия напыленных частиц с кислородом окружающей среды (ZrO₂, Al₂SiO₅, ZrSiO₄). Это явление отсутствовало в случае использования технологии плазменного напыления ZrB₂-SiC-покрытия в закрытых камерах с контролируемой средой [11].

При анализе результатов РСФА и оптической металлографии установлено некоторое отличие фазового состава покрытий, полученных при использовании плазменной струи с дозвуковой и сверхзвуковой скоростью истечения.

Испытание термостойкости ZrB₂-SiC-AlN-покрытий путем циклического нагрева пламенем кислород-пропан-бутановой горелки с последующим воздушным охлаждением провели в течение 15 циклов и без разрушения и отслоения покрытия толщиной около 400 мкм.

Под воздействием термоциклических нагревов формируется трехзонная структура плазменного ZrB₂-SiC-AlN-покрытия с изменением содержания кислорода вглубь покрытия от 50 до 30 мас. %. Верхняя зона состоит из муллита Al₂SiO₅, являющегося матричной составляющей покрытия, с многочисленными включениями ZrO₂ субмикронных размеров, и обладает пористостью, сформированной при испарении первоначально образованных участков фазы В₂О₃. Средняя зона содержит смесь фаз ZrO₂ и силикатов (или боросиликатов) и системы Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃, характеризуется высокой плотностью и сопротивлением диффузии O₂, что определяет ее защитные свойства. Нижняя зона, расположенная в контакте с поверхностью КМ C/C-SiC, соответствует по составу исходному напыленному покрытию ZrB₂-SiC-AlN с включениями оксидных фаз — продуктов окисления.

Испытания плазменного ZrB₂-SiC-AlN-покрытия на термостойкость в условиях циклического нагрева пламенем кислород-пропан-бутановой горелки в течение 2 мин с охлаждением на воздухе показали, что после 15 циклов нагрева покрытие сохранило целостность и свои защитные свойства.

Список литературы/References

1. Сорокин О.Ю., Гращенко Д.В., Солнцев С.Ст., Евдокимов С.А. (2014) Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов (обзор). *Труды ВИАМ*, 06-08.
Sorokin, O.Yu., Grashchenkov, D.V., Solntsev, S.St., Evdokimov, S.A. (2014) Ceramic composite materials with high oxidation resistance for perspective aircrafts (Review). *Trudy VIAM*, 06-08 [in Russian].
2. Roger R. (2005) Naslain, Fiber-reinforced ceramic matrix composites: state of the art, challenge and perspective. *Composites*, 5, 1, 3-19.
3. Krenkel W., Berndt F. (2005) C/C-SiC composites for space applications and advanced friction systems. *Mat. Sc. and Engng. A*, 4, 177-181.
4. Heidenreich B. (2007) Carbon fibre reinforced SiC materials based on melt infiltration. *Proc. of 6th Int. Conf. on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HTCMC 6)*.
5. Kumar S., Chandra R., Kumar A. et al. (2015) C/SiC composites for propulsion application. *Composites and nanostructures*, 7, 4, 225-230.
6. Ткаченко Л.А., Шувалов А.Ю., Берлин А.А. (2012) Защитные жаропрочные покрытия углеродных материалов. *Неорганические материалы*, 48, 3, 261-271.
Tkachenko, L.A., Shuvalov, A.Yu., Berlin, A.A. (2012) High-temperature protective coatings of carbon materials. *Neorganicheskie Materialy*, 48(3), 261-271 [in Russian].
7. Лебедева Ю.Е., Попович Н.В., Орлова Л.А. (2013) Защитные высокотемпературные покрытия для композиционных материалов на основе SiC. *Труды ВИАМ*, 2, 1-7.
Lebedeva, Yu.E., Popovich, N.V., Orlova, L.A. (2013) High-temperature protective coatings for composite materials based on SiC. *Trudy VIAM*, 2, 1-7 [in Russian].
8. Xiang Yang, Chen Zhao-hui, Cao Feng (2014) High-temperature protective coatings for C/SiC composites. *J. of Asian Ceramic Societies*, 2, 4, 305-309.
9. Sufang Tang, Jingyi Deng, Shijun Wang et al. (2007) Ablation behaviours of ultra-high temperature ceramic composites. *Mat. Sc. and Engng. A*, 6, 1-7.
10. Marschall J., Pejakovic D.A., Fahrenholtz W.G. et al. (2009) Oxidation of ZrB₂-SiC Ultrahigh - Temperature Ceramic Composites in Dissociated Air. *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, 23, 2, 267-278.
11. Valente T., Bartuli C., Visconti G., Tului M. Plasma sprayed Ultra High Temperature Ceramics for Thermal Protection Systems, *Proc. ITSC'2000*, 837-841.
12. Bartuli C., Valente T., Tului M. (2001) High temperature behavior of plasma sprayed ZrB₂-SiC composite coatings. *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium*. Ohio, USA, pp. 259-262.
13. Bartuli C., Valente T., Tului M. (2002) Plasma sprayed deposition and high temperature characterization of ZrB₂-SiC protective coatings. *Surfaces and Coating Technology*, 5, 260-273.
14. Tului M., Ruffini F., Arezzo F. et al. (2002) Some properties of atmospheric air and inert gas high-pressure plasma sprayed ZrB₂ coatings. *Ibid*, 5, 3, 483-489.
15. Tului M., Marino G., Valente T. (2006) Plasma spray deposition of ultra high temperature ceramics. *Ibid*, 9, 2103-2108.
16. Tului M., Lionetti S., Pulci G. et al. (2008) Effects of heat treatments on oxidation resistance and mechanical properties of ultra high temperature ceramic coatings. *Ibid*, 10, 4394-4398.
17. Tului M., Lionetti S., Pulci G. et al. (2010) Zirconium diboride based coatings for thermal protection of re-entry vehicles: Effect of MoSi₂ addition. *Ibid*, 10, 1065-1069.
18. Zou B., Khan Z.S., Fan X. et al. (2013) A new double layer oxidation resistant coating based on Er₂SiO₈/LaMgAl₁₁O₁₉ deposited on C/SiC Composites by atmospheric plasma spraying. *Ibid*, 11, 101-108.
19. Zou B., Khan Z.S., Gu L., Fan X. et al. (2012) Microstructure, oxidation protection and failure mechanism of Yb₂SiO₅/

- LaMgAl₁₁O₁₉ coating deposited on C/SiC composites by atmospheric plasma spraying. *Corrosion Science*, **8**, 192–200.
20. Григорьев О.Н., Панасюк А.Д., Подчерняева И.А. и др. (2018) Механизм высокотемпературного окисления композиционной керамики на основе ZrB₂ системы ZrB₂-SiC-AlN. *Порошковая металлургия*, **1/2**, 93–98.
Grigoriev, O.N., Panasyuk, A.D., Podchernyaeva, I.A. et al. (2018) Mechanism of high-temperature oxidation of composite ceramics based on ZrB₂ of ZrB₂-SiC-AlN system. *Poroshk. Metallurgiya*, **1/2**, 93–98 [in Russian].
21. Борисов Ю.С., Кривцун И.В., Эрритт У. (2000) Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления. *Автоматическая сварка*, **1**, 42–51.
Borisov, Yu.S., Krivtsun, I.V., Erritt, U. (2000) Computer modelling of plasma spraying process. *The Paton Welding J.*, **1**, 40–50.
22. Петров С.В., Карп И.Н. (1993) *Плазменное газозвдушеное напыление*. Киев, Наукова думка.
Petrov, S.V., Karp, I.N. (1993) *Plasma gas-air spraying*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
23. Орданьян С.С., Дмитриев А.И., Морошкина Е.С. (1987) Взаимодействие SiC с ZrB₂. *Известия АН СССР. Неорганические материалы*, 1752–1754.
Ordanyan, S.S., Dmitriev, A.I., Moroshkina, E.S. (1987) Interaction of SiC with ZrB₂. *Izv. AN SSSR. Neorganicheskie Materialy*, 1752–1754 [in Russian].
24. Кривошеин Д.А., Маурах М.А., Дергунова В.С. и др. (1980) Механизм формирования стеклообразных пленок на поверхности материала системы ZrB₂-ZrC-SiC-C при его окислении. *Порошковая металлургия*, **8**, 58–62.
Krivoshein, D.A., Maurakh, M.A., Dergunova, V.S. et al. (1980) Mechanism of formation of glass-like films on surface of material of ZrB₂-ZrC-SiC-C system in its oxidation. *Poroshk. Metallurgiya*, **8**, 58–62 [in Russian].
25. Торопов Н.И., Барзаковский В.П., Лапин В.В. и др. (1972) *Диаграммы состояния силикатных систем* (справочник). Вып. 3. Ленинград, Наука, сс. 290–293.
Tropov, N.I., Barzakovsky, V.P., Lapin, V.V. et al. (1972) *State diagrams of silicate systems: Handbook*, Issue 3. Leningrad, Nauka, 290–293 [in Russian].

СТРУКТУРА ТА ФАЗОВИЙ СКЛАД ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ZrB₂-SiC-AlN НА ПОВЕРХНІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ C/C-SiC

Ю.С. Борисов¹, А.Л. Борисова¹, А.П. Грищенко¹, Н.В. Вігілянська¹, М.В. Коломицев¹, М.А. Васильківська²

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

²ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3

Досліджено процес формування на поверхні композиційного матеріалу C/C-SiC захисного плазмового покриття ZrB₂-SiC-AlN. Нанесення покриття було проведено з використанням дозвукового Ar/N₂-плазмового струменя і надзвукового струменя повітряно-газового плазматрона. Встановлено роль міжфазних явищ, що протікають в процесі плазмового напылення в об'ємі частинок композиційного порошку ZrB₂-SiC-AlN, в формуванні шару покриття. Показано, що склад і швидкість напылюючого плазмового струменя впливають на структуру і фазовий склад ZrB₂-SiC-AlN-покриття, що утворюється. Проведено випробування стійкості отриманих покриттів до термоциклічного нагрівання струменем полум'я кисень-пропан-бутанового пальника. Покриття товщиною 400 мкм показало збереження захисних властивостей після 15 термоциклів. Вивчено вплив термоциклічного нагріву на формування за результатом процесу окислення в захисному покритті трьохзонної структури, будова і фазовий склад якої були досліджені методами РСФА і РСМА. Встановлено, що поверхневий шар покриття після термоциклічного нагріву складається з матриці на основі Al₂SiO₅ з субмікронними включеннями ZrO₂. Бібліогр. 25, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: плазмове напылення, захисне покриття, композиційний матеріал, ультрависокотемпературна кераміка, мікроструктура, фазовий склад, міжфазна взаємодія, оксидні мікрвключення

STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF ZrB₂-SiC-AlN PLASMA COATINGS ON THE SURFACE OF C/C-SiC COMPOSITE MATERIALS

Yu.S. Borisov¹, A.L. Borisova¹, A.P. Grishchenko¹, N.V. Vigilianskaya¹, M.V. Kolomiitsev¹, M.A. Vasilkovskaya²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²I.N. Frantsevich IPM of the NAS of Ukraine. 3 Krzhizhanovskii Str., 03142, Kyiv, Ukraine

The process of formation of protective plasma ZrB₂-SiC-AlN coating on the surface of C/C-SiC composite material was studied. Coating was applied by subsonic Ar/N₂-plasma jet and supersonic jet of air-gas plasmatron. The role of interphase phenomena occurring during plasma spraying in the volume of particles of ZrB₂-SiC-AlN composite powder in formation of the coating layer was established. It is shown that the composition and velocity of the plasma spray jet affects the structure and phase composition of the forming ZrB₂-SiC-AlN coating. Resistance of the produced coatings to thermal cyclic heating by a flame jet of oxygen-propane-butane torch was tested. Coating of 400 μm thickness showed preservation of protective properties after 15 thermal cycles. Effect of thermocyclic heating on formation of a three-zone structure in the protective coating, as a result of oxidation process was studied. Its texture and phase composition was examined by XSPA and RSMA techniques. It is found that the surface layer of the coating after thermocyclic heating consists of Al₂SiO₅-based matrix with submicron ZrO₂ inclusions. 25 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

Keywords: plasma spraying, protective coating, composite material, ultra high temperature ceramics, microstructure, phase composition, interphase interaction, oxide microinclusions

Поступила в редакцію 13.02.2019

ГАЗОПОРОШКОВОЕ НАПЫЛЕНИЕ КАК ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Грузевич^{1,2}, Д.А. Дереча^{2,3}

¹Трипольская ТЭС. 08720, г. Украинка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины. 03142, г. Киев, бульв. Акад. Вернадского 36, б

³Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 57.

В работе предложено напыление как перспективный и высокоэффективный метод повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС. Поскольку основным видом износа трубных элементов энергетического оборудования ТЭС является золотой износ и коррозия, то для повышения их надежности, срока службы и работоспособности предложено использовать электродуговое напыление с помощью материала ПП 70X10P3Ю5 как метод газотермической модификации поверхностей нагрева. Целью работы является исследование эффективности применения напыления для повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС. Напыление поверхностей нагрева осуществлялось на двух тепловых электростанциях ПАО «Центрэнерго» в 2013 г. Технично-экономическое обоснование показало, что внедрение технологии напыления позволяет в 1,5...2,0 раза снизить затраты по сравнению с убытками, понесенными ТЭС в случае аварийных отключений и повысить предположительно ресурс службы оборудования в 1,4 раза. Библиогр. 15, табл. 7, рис. 12.

Ключевые слова: напыление, энергетическое оборудование, трубы, гибы, надежность, котлы, экономайзер, теплоэлектростанция

Интенсивное изнашивание теплообменных поверхностей котлов теплоэлектростанций (ТЭС), в частности, экранных труб и труб экономайзеров, обусловлено использованием в качестве топлива угольной пыли с большой частью твердых негорючих примесей [1–3]. Анализ повреждений по классификационным признакам [4] показывает, что основной причиной повреждения котельных труб является коррозионно-эрозионный износ. По данным работы [5], на отдельных блоках его доля достигала 60 %. Особенно часто страдают от эрозии змеевики водяных экономайзеров. Абразивные частицы золы, увлекаемые дымовыми газами, с большой скоростью ударяют в поверхность труб и вызывают золотой износ (рис. 1). На поверхности экранных труб из стали 12X1МФ при повышенных температурах до 585 °С образуются пленки оксидов железа, которые имеют слабое сцепление с поверхностью стали и легко изнашиваются абразивными частичками. Изнашивание внешней поверхности труб происходит неравномерно по большой площади, локализуется в определенных местах и при достижении критической толщины стенки трубы происходит ее разрыв, который приводит к остановке энергоблока. Тепловая нагрузка на внешнюю стенку трубы также повышается через отложение солей на внутренних поверхностях экранных труб, которые, кроме того, испытывают

© А.В. Грузевич, Д.А. Дереча, 2019



Рис. 1. Характер повреждения трубы диаметром 32×6 мм водяного экономайзера в результате действия золотого износа

коррозионно-эрозионные повреждения, поэтому разработка новых эффективных методов повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС является актуальным направлением.

Повреждения трубных элементов поверхностей нагрева энергетического оборудования ТЭС имеют характер механизмов ползучести с проявлением усталости, протекания процессов эрозии и газовой коррозии (окисления) через экстремально-высокие условия эксплуатации, связанные с высокими значениями температуры, присутствующими циклическими нагрузками и агрессивностью рабочей среды, а также через абразивное действие продуктов сгорания угольного топлива [2, 3].

Анализ методов повышения надежности работы энергетического оборудования. Поскольку основным видом износа на водяном экономай-

зере (ВЭ) котлов ТЭС является золовой износ, а между планками дистанционирования — коррозия, то в работах [3, 6] предложено комплексное решение проблемы продления эксплуатационного ресурса экранных труб котлов и труб экономайзеров за счет разработки новых жароустойчивых и износоустойчивых газотермических покрытий. В результате, в структуре таких покрытий, при эксплуатации труб котлов и труб экономайзеров, будут протекать дисперсионные процессы упрочнения за счет выделения в металле мелкодисперсных фаз карбидов, нитридов и интерметаллидов, которые существенно повысят их эксплуатационные свойства при работе.

В работах [7, 8] показано, что для повышения надежности работы энергетического оборудования электростанций при золовом и коррозионном износе возможно применить наплавку. Разработанные в настоящее время порошковые самофлюсующиеся износостойкие и антикоррозионные сплавы, а также технология их нанесения позволяет создавать на поверхности деталей металлические покрытия с заранее заданными свойствами. Газопорошковая наплавка с помощью самофлюсующихся износостойких сплавов нашла широкое применение при восстановлении изношенных и защите новых участков труб водяных экономайзеров котлов на блочных ТЭС.

Современная промышленность располагает значительным выбором специальных порошков для наплавки и напыления, которые придают разнообразные свойства напыляемой поверхности, в том числе и абразивную износостойкость, коррозионную стойкость, износостойкость при повышенных температурах и в агрессивных средах. Это порошки на основе хрома, никеля и карбидообразующих элементов.

Как защитное покрытие используется металлический порошок ПГ-СР марки ПР-Н80Х13С2Р ТУН-1-3785-84 фракции «ОМ» или порошок ПР-Н77Х15С3Р2 (ПГ-12Н-02) [9], который в результате нанесения покрытия оплавляется. Нанесение порошка на трубные элементы поверхностей нагрева котлов при наплавке выполняется в несколько слоев с различной толщиной и шириной. Режимы наплавки проводится выбор необходимых характеристик защитного слоя. Это позволяет увеличить их срок службы на 10-15 лет.

В работе [3] для восстановления и защиты труб и элементов, которые подверглись золовому износу, используют сварочные технологии, при которых восстанавливающая обработка тонкого участка трубного элемента из стали 20 водяных экономайзеров выполняется с помощью руч-

ной дуговой (аргонодуговой) сварки. Применение ручной дуговой сварки в случае выполнения наплавки трубных элементов экономайзеров котлов предусматривает использование электродов Э50А для стали 20 и Э-09Х1МФ для стали 12Х1МФ; при ручной аргонодуговой сварке — используют присадочные проволоки Св-08ГС и Св-08Г2С для труб из стали 20, Св-08ХМ для труб из стали 12Х1МФ с температурой эксплуатации до 510 °С и Св-08ХМФА для труб из стали 12Х1МФ с температурой эксплуатации выше 510 °С.

Также на водяных экономайзерах котлов ТЭС для защиты гибов и прямых участков труб, подверженных износу, применяются индивидуальные манжеты (рис. 2).

Безусловно, данный способ позволяет повысить срок службы и надежность работы труб, однако применение манжет для защиты труб поверхностей нагрева в местах расположения планок дистанционирования за счет местного увеличения сечения является нерациональным, поскольку манжеты не обладают специальными свойствами для защиты труб от коррозионно-эрозионного воздействия. Коррозионно-эрозионные процессы будут протекать в любом случае, а дополнительное увеличение веса труб (за счет применения манжет) повысит нагрузку на трубы змеевиков, которая не учитывалась при проектировании, что может повлиять на работоспособность сварных соединений (трещины по сварным соединениям и ЗТВ, защемления). Кроме того, за счет применения манжет происходит местное увеличение диаметра труб и как следствие, уменьшение проходного сечения для топочных газов между отдельными трубами, что ухудшает аэродинамику потоков газа и приводит к повышенному износу труб соседних змеевиков, усложняет доступ к отдельным пакетам змеевиков и снижает их ремонтпригодность.

В технологическом зазоре нахлесточного соединения (между трубами) возможно встретить развитие коррозии, а наличие манжеты снаружи не позволяет вести должный контроль за состоянием металла трубы под ней.

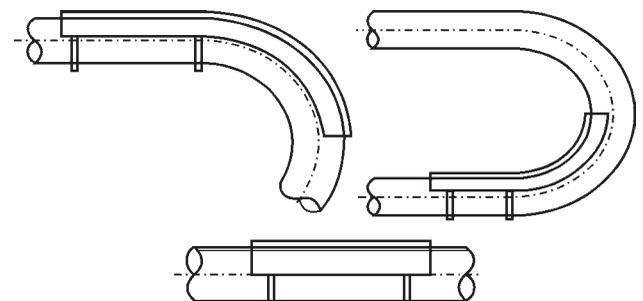


Рис. 2. Индивидуальные манжеты для защиты гибов и прямых участков труб водяного экономайзера котлов ТЭС

Для местной защиты труб под планками дистанционирования предложено применение локального газопорошкового нанесения специальными металлическими покрытиями [10].

К недостаткам приведенных методов газопорошковой и дуговой наплавки можно отнести высокие тепловложения, которые могут вызвать возможно коробление труб змеевика, структурные изменения в ферритно-перлитной структуре стали и предъявляемые высокие требования к квалификации сварщика.

Одним из перспективных методов повышения надежности работы энергетического оборудования является электродуговое напыление.

Физико-механическим институтом им. В. Карпенко НАН Украины разработана технология защиты нагревательных элементов тепловых электростанций от абразивного износа и газовой коррозии [11], которая предполагает нанесение экономно-легированных электродуговых покрытий из порошковой проволоки на поверхность экранных труб и труб экономайзеров тепловых электростанций с целью их эффективной защиты от абразивного износа и газовой коррозии при температурах эксплуатации до 600 °С. Данная технология позволяет вдвое повысить долговечность защищенных труб.

Применение металлизации позволит:

- придать коррозионно-эрозионную стойкость участкам труб при повышенных температурах;
- не увеличивать суммарный вес поверхностей нагрева;
- не затруднять доступ к отдельным пакетам змеевиков;
- не затруднять визуальное наблюдение за наружной поверхностью труб и в местах расположения планок дистанционирования;
- снизить трудоёмкость предлагаемых мероприятий за счет устранения операций по изготовлению гильз, сборке сварных соединений под манжеты;

Следовательно, применение металлизации является наиболее выгодным методом защиты труб поверхностей нагрева.

Целью работы является исследование применения электродугового напыления (металлизации) для повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС.

Обоснование выбора системы легирования и порошковой проволоки. Жаростойкость металла системы легирования Fe–Cr–B–Al обеспечивается формированием на его поверхности оксидной пленки Al₂O₃, которая характеризуется высокой химической и термической стабильно-

стью. При повышенных температурах диффузия кислорода и азота в переходные слои приводит к образованию оксидов железа Fe₂O₃ и нитридов алюминия AlN, что снижет жаростойкость покрытия. С целью смягчения негативного влияния указанных оксидов, в систему покрытия введен кремний, который способствует образованию диффузионного слоя SiO₂, препятствующего окислению подокалинного слоя. Износостойкость покрытия обеспечивается содержанием в составе покрытия мелкодисперсных железохромистых карбидов (Fe,Cr)₇C₃, шпинелей (Fe,Cr)₂O₃.

Методика. Электродуговое напыление в струе сжатого воздуха поверхностей нагрева осуществлялось на двух тепловых электростанциях ПАО «Центрэнерго» в 2013 г. Бывшие в эксплуатации на блоке № 2 змеевики водяного экономайзера Трипольской ТЭС (ТпТЭС) после двух лет работы были демонтированы и подвергнуты напылению методом металлизации. Перед напылением для определения механических и металлографических свойств металла бывших в эксплуатации змеевиков из труб вырезаны контрольные образцы. Результаты механических испытаний на определение предела прочности приведены в табл. 1.

При проведении металлографического анализа исследования проводились по всему периметру трубы с увеличением ×100 и ×500. Ферритно-перлитная структура металла по всему сечению исследуемого образца одинаковая. Результаты приведены в табл. 2.

При проведении механических и металлографических испытаний образцов труб отклонений от нормативных требований [12] не выявлено, после чего принято решение о нанесении защитного покрытия методом металлизации.

Таблица 1. Механические характеристики труб до металлизации

σ _в , МПа	δ, %	ψ, %
503	28,8	60
По требованиям ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов»		
420...560	24	45

Таблица 2. Структурные характеристики труб до металлизации

Микроструктура	Балл структуры по шкале ТУ 14-3-460	Балл полочности по шкале ТУ 14-3-460	Балл графитизации согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009
Вырезка с ВЭ	0	0	1 (графитизации не выявлено)

Таблица 3. Состав напыленного слоя

Номер образца	Содержание легирующих элементов, мас. %								
	Fe	Cr	Al	Si	Ni	Cu	Ti	Zn	Mo
1	76,04	11,76	5,41	5,36	0,17	0,08	0,14	0,13	0,05
2	77,39	11,27	5,58	4,66	0,15	0,09	0,11	0,1	0,09
3	75,13	11,33	5,52	5,67	0,19	0,09	-	0,04	-
4	76,95	12,37	6,04	3,5	0,18	0,11	0,11	0,06	0,04

Работы по нанесению покрытия проводились на ремонтной площадке ТпТЭС по разработанной методике [13].

Подготовка трубных элементов к металлизации заключалась в очистке и активации поверхности методом пескоструйной обработки. Качество подготовки трубных элементов к напылению контролировалось визуальным осмотром.

Для выполнения работ по нанесению защитного покрытия на трубы поверхностей нагрева применяли комплект оборудования, в состав которого входили: аппарат для пескоструйной обработки, электродуговой металлизатор, фильтр-влагодетель, кассеты с порошковой проволокой, шкаф электрический, источник питания.

В процессе напыления проводился пооперационный контроль, при котором подлежали проверке качество подготовки поверхностей нагрева к напылению, режим напыления, порядок нанесения слоев напыленного металла, зернистость и цвет покрытия. Напыление велось без использования подложки. Трубы после металлизации не подвергались термообработке.

После проведения напыления защитного слоя змеевики были установлены на паровой котел сверхкритического давления ТПП-210 А блок стационарный №1 корпус А. В качестве топлива по проекту для котла ТПП-210 А используется уголь марки АШ.

На Углегорской ТЭС (УгТЭС) напылению были подвергнуты две поверхности нагрева: КПП н.д. (сталь 12Х1МФ) между планками дистанциониро-

вания и гибы возле стенок парового котла сверхкритического давления ТПП-312 А блок стационарный № 4. Также напылению подлежал водяной экономайзер (сталь 20) парового котла сверхкритического давления ТПП-312 А блок стационарный № 2. В качестве топлива по проекту для котла ТПП-312 А используется уголь марки Г. Установлено, что на ТпТЭС и УгТЭС основным видом износа на водяном экономайзере являлся золовой, а между планками дистанционирования — коррозия, поэтому напыление на поверхностях нагрева проводилось одним и тем же материалом – порошковой проволокой ПП 70Х10Р3Ю5.

Состав напыленного слоя приведен в табл. 3. На Трипольской ТЭС состав контролировали рентгенофлуоресцентным спектрометром NITON XL2.

Электродуговое напыление проводилось в 2013 г. на наиболее абразивно-изнашиваемые участки змеевиков водяного экономайзера котлов ТПП-210 А и ТПП-312 А коррозионно-повреждающихся участков труб змеевиков КПП н/д в планках дистанционирования котла ТПП-312 А.

Внешний вид напыленных змеевиков приведен на рис. 3.

После напыления и во время эксплуатации проводились вырезки с труб поверхностей нагрева, микроструктура которых для надежной эксплуатации должна соответствовать требованиям [12].

На Углегорской ТЭС после металлизации для проведения металлографического исследования из



Рис. 3. Внешний вид напыленных змеевиков

напыленной трубы КПП н.д. было вырезано 2 контрольных образца: один — непосредственно изгиба (с напылением на поверхности), а второй (контрольный) — на расстоянии 150 мм от напыленной зоны. Шлифы изготавливались последовательным шлифованием и полированием. Травление шлифов производилось в 4%-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Для металлографического анализа использовался микроскоп МИМ-8М, при увеличениях $\times 100$ и $\times 500$ раз. Структура контрольного образца — ферритно-перлитная.

Стилоскопирование проводилось на стационарном стилоскопе СЛ-13. Внешнему осмотру подвергались напыленные трубы и гибы. Механические испытания проводились на сплющивание и на определение механических свойств.

На Трипольской ТЭС после проведения металлизации змеевиков водяного экономайзера $\text{Ø}32 \times 6$ мм из стали 20 вырезались катушки (производственные образцы), далее из них вырезались темплеты, которые испытывались на сплющивание. Отслаивание слоя покрытия происходит после схождения внутренних сторон до $H_{\text{вн}} = 15$ мм. Схождение сторон выполнялось до $H_{\text{вн}} = 10$ мм. Напыленный слой подвергался измерению твердости на ультразвуковом твердомере ТКМ-459.

Результаты исследования. Внешний осмотр труб и гибов показал, что напыленный слой имеет грубую шероховатую поверхность с металлическим блеском. При детальном рассмотрении напыленной поверхности на ней различаются обособленные крупные кристаллы, которые и придают ей значительную шероховатость. Напыление имеет равномерное и сплошное распределение по наружной поверхности гибов. На рис. 4 представлен внешний видгиба трубы и макроструктура ее поверхности, а на рис. 5 — микроструктура поверхности трубы. Структура после металлизации не претерпела изменений и соответствовала нормативным требованиям.

Качественным спектральным анализом установлено, что напыленный защитный слой трубы водяного экономайзера, полученный методом электродуговой металлизации, представляет собой композит с упрочняющейся карбидной фазой в металлической матрице и содержит такие легирующие элементы, как хром и алюминий. Содержание карбидной фазы порядка 40 %. Основной металл — углеродистая сталь (легирующие элементы не обнаружены).

В микроструктуре напыленных труб из стали марки 20 (рис. 6) ориентация по видманштеттовой структуре не должна превышать 3-го балла шкалы 2 Приложения Б «Шкалы полосчатости и видманштеттовой структуры металла котельных труб».

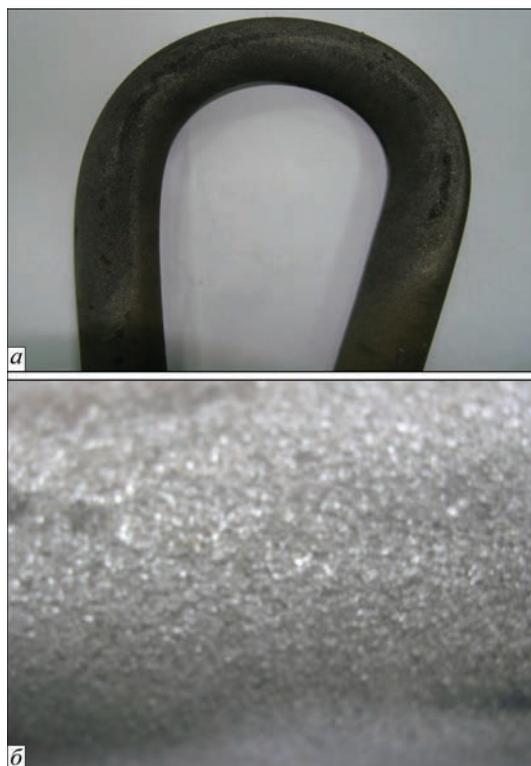


Рис. 4. Внешний видгиба трубы (а) и макроструктура ее поверхности (б)

При проведении металлографического исследования труб КПП н.д. Углегорской ТЭС установлено, что для исходной структуры металла трубы характерна значительная строчечность, что является отклонением от нормативов и свидетельствует о некачественной термической обработке труб после прокатки в процессе их изготовления. Структура напыленного образца как и у контрольного — ферритно-перлитная; видимых структурных изменений не установлено.

Под напыленным слоем просматривается узкая пограничная полоса основного металла толщиной от 0,07 до 0,15 мм, которая подверглась взаимодействию с напыленным слоем. Структура матрицы этой полосы такая же, как и у основного металла — ферритно-перлитная. В пределах этой полосы применяемый травитель контрастно не выделил вкрапления напыленного материала, однако можно предположить, что диффузионные вкрапления должны там присутствовать.

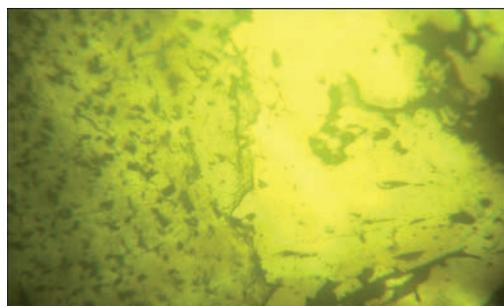


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) напыленного слоя

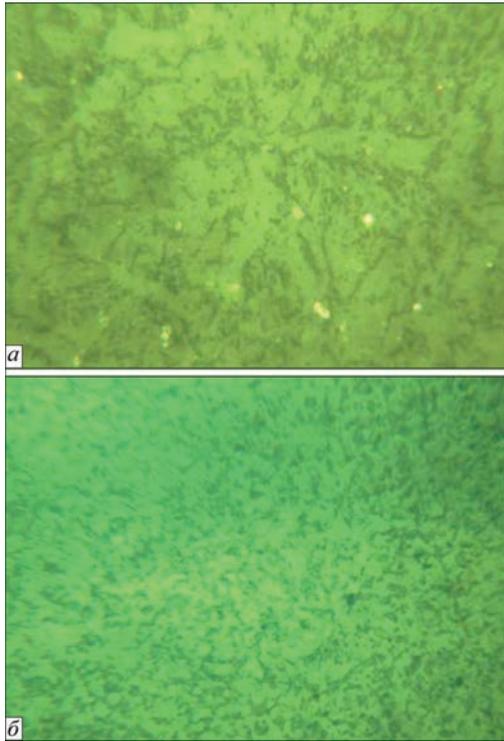


Рис. 6. Микроструктура напыленных труб из стали 20: *a* — $\times 500$; *b* — $\times 100$



Рис. 7. Образцы после испытания на сплющивание



Рис. 8. Внешний вид отслоившегося напыленного слоя после испытания на сплющивание

Использованный травитель не дал возможности выделить в структуре напыления никаких структурных составляющих (не использовались специальные химические реактивы). Однако по-

Таблица 4. Механические свойства металла труб после напыления

$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %
511	28,2	58
ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009		
420...560	24	45

зволил установить рыхло-слоистое и пористое (немонолитное) строение напыления, которое обусловлено технологическими особенностями электродуговой металлизации.

В обоих случаях толщина напыленного слоя варьируется на различных участках трубы. Так, в лобовой точке трубы толщина напыления достигает 0,42 мм, а на боковых — до 0,2 мм. С учетом пограничного слоя основного металла, который подвергся диффузии в него напыляемого материала, можно констатировать, что наибольшая толщина напыления составляет 0,57 мм (на лобовой части гйба).

При проведении технологических испытаний на сплющивание трещин, надрывов по основному металлу трубы не выявлено. После испытаний на сплющивание (рис. 7) для отслоившегося слоя (0,55 мм) (рис. 8) проведен рентгенофлуоресцентный анализ, который показал следующий химический состав: 11,7...12,21 % Cr; 0,12 % Ni; 4,0...5,65 % Si; 4,37...5,87 % Al; 0,37...0,44 % S.

Разрушение поверхностного слоя происходит отслаиванием крупных фрагментов напыленного слоя. При проведении механических испытаний на определение предела прочности трубы после напыления были получены результаты, приведенные в табл. 4.

Полученные результаты механических испытаний соответствуют требованиям ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009.

Участки напыленного слоя имеют твердость HRC 54-58. Поверхностный слой под отслоившимся покрытием имеет следующий химический состав: 91,47 % Fe; 2,78 % Cr; 3,9 % Si; 1,1 % Al; 0,26 % S. Твердость поверхности под слоем напыления составляет HB 200–217.

Таким образом, полученные результаты могут свидетельствовать о том, что основной металл после напыления не претерпел существенных изменений микроструктуры и механических свойств и отвечал требованиям соответствующих технических условий.

После трехлетней эксплуатации труб и гйбов на Трипольской ТЭС проведен спектральный анализ поверхностного слоя покрытия. Состав слоя изменился незначительно (табл. 5).

При проведении вырезов после 6 лет эксплуатации также фиксировались макро- и микроструктура напыленных труб (рис. 9, 10), состав поверхностного слоя (табл. 6). Проведены технологические испытания на сплющивание, замер твердости не проводили.

Макроструктура напыленных труб после 6 лет эксплуатации приведена на рис. 9.

Таблица 5. Состав напыленного слоя после трехлетней эксплуатации на ТЭС

Номер образца	Содержание легирующих элементов, %				
	Fe	Cr	Al	Si	Ni
1	Основа	11,41	5,67	5,67	0,15
2	->-	10,89	5,87	5,50	0,17

Таблица 6. Состав напыленного слоя после шестилетней эксплуатации на ТЭС

Номер образца	Содержание легирующих элементов, мас. %				
	Fe	Cr	Al	Si	Ni
1	Основа	12,9	6,67	7,9	0,1
2	->-	12,7	5,79	7,1	0,1

Со временем эксплуатации поверхность становится более грубой, на поверхности видны выступающие карбиды разного размера. Исследование микроструктуры до и после изнашивания в потоке угольной пыли при рабочих параметрах водяного экономайзера показывает переориентацию карбидного каркаса в матрице. Поверхностный диффузионный слой имеет следующий химический состав: 3,27 % Cr; 1,87 % Si; 0,9 % Al; 0,3 % S.

Горизонтальный характер линии на рис. 11 показывает, что на протяжении 6 лет концентрация хрома в поверхностном слое практически не изменилась и даже немного повысилась, происходит его накапливание в поверхностном слое. Увеличение концентрации алюминия в поверхностном слое скорее всего связано с осаждением на трубах змеевиков алюминийсодержащих элементов, образующихся в процессе сжигания органического топлива.

Разрушение поверхностного слоя при испытании образцов происходит путем растрескивания покрытия на мелкие фрагменты и его выкрашивания (рис. 12). Как мы видим, выдержка покрытий при рабочих параметрах приводит к изменению механики их разрушений, что возможно вызвано изменением в структуре дисперсных фаз. Твердость напыленного слоя измерить не удалось. Твердость поверхности под слоем напыления составляет *HB* 180.



Рис. 9. Макроструктура напыленных труб после 6 лет эксплуатации

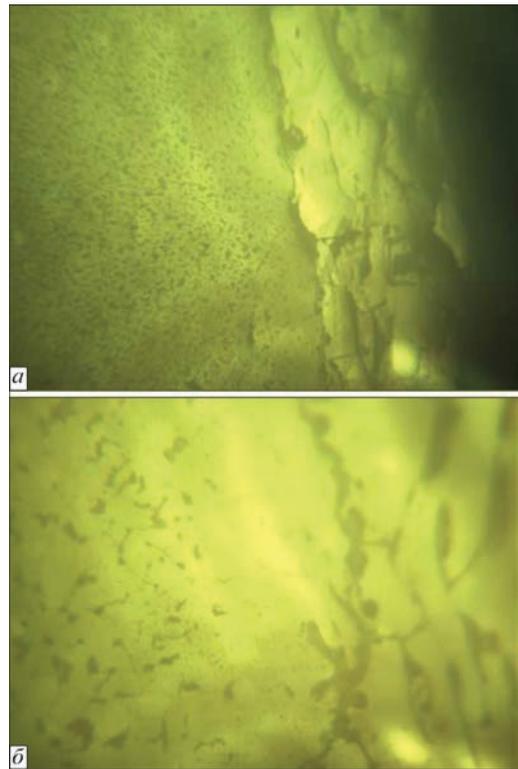


Рис. 10. Микроструктура напыленных труб после 6 лет эксплуатации: а — $\times 100$; б — $\times 500$

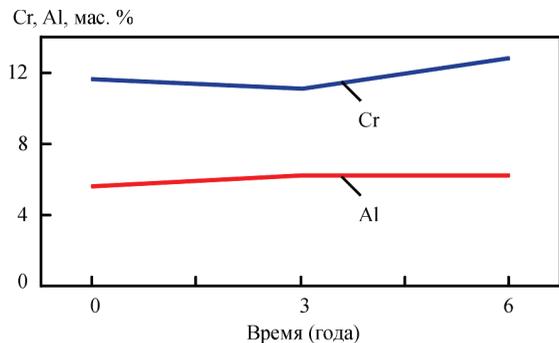


Рис. 11. Изменение концентрации хрома и алюминия в поверхностном слое покрытия в зависимости от срока эксплуатации

На каждой электростанции собираются данные по фактической толщине стенок труб поверхностей нагрева разрушающими и неразрушающими методами. При проведении вырезов из труб



Рис. 12. Внешний вид трубы после 6 лет эксплуатации (испытание на схождение сторон)

Таблица 7. Характеристика труб до напыления

Номер блока	Поверхность со стороны нагрева	Поверхность со стороны рабочей среды	Марка материала	Номер змеевика	Номер трубы	Утонение, мм				Наработка
						Левый бок	Правый бок	Наружный	Внутренний	
1	В/Э	АШ	Сталь 20	152	1	-0,4	-0,4	-0,5	+0,2	11296
1	В/Э	АШ	Сталь 20	150	1	-0,5	-0,5	-0,8	+0,1	12138
1	В/Э (после напыления)	АШ	Сталь 20	151	1	+0,4	+0,5	+0,7	+0,2	9084

фиксируются данные по ее толщине, микроструктуре и механическим свойствам. Для замера утонения труб используется методика прямого замера толщины стенки. Итоговые данные по характеристике труб до напыления, а также время работы каждого вырезанного образца сведены в табл. 7.

Анализируя данные по утонению, можно заключить, что во всех случаях с увеличением времени эксплуатации растет и величина утонения стенки от золотого износа.

Наибольшая интенсивность золотого износа наблюдается на первых двух трубах двадцати крайних змеевиков водяного экономайзера. Это явление, скорее всего, связано с конструктивной особенностью газового тракта пылеугольного П-образного котла. При выходе с ВРЧ, в поворотной камере, газы меняют свое направление и наиболее крупные частицы продуктов сгорания топлива забрасываются на периферию общего потока. Увеличение их плотности в потоке способствует интенсификации золотого износа двадцати крайних змеевиков водяного экономайзера.

После металлизации поверхности труб змеевиков водяного экономайзера выявлено снижение интенсивности золотого износа змеевиков. Во время проведения замера толщины стенки на контрольных вырезках утонения не зафиксировано.

Таким образом, в данном случае можно допустить зависимость влияния твердости на скорость золотого износа и сделать вывод, что с повышением твердости износостойкость возрастает. Это наблюдение согласуется с моделью эрозионного износа [14].

Сварка. На Трипольской ТЭС исследованы два варианта сварки труб из стали 20 после металлизации. Первый — электродуговая сварка труб после металлизации электродами ЦУ-5 – 2,5 мм с трубами, не прошедшими металлизацию. Второй — сварка электродами ЦУ-5 при стыковке труб, прошедших металлизацию между собой.

Сварка проводилась в соответствии с [15]. Перед сваркой кромки труб разделявали под углом 40...45° с их очисткой в районе торцов. Диаметр стержня электродов ЦУ-5 — 2,5 мм. По внешнему виду сварные швы в удовлетворительном состоянии. Растрескиваний, пор, раковин, под-

резов и других наружных дефектов не наблюдалось. Поверхностный слой труб с металлизацией в районе сварного соединения зачищался для проведения контроля неразрушающими методами. Ультразвуковым контролем внутренних дефектов в стыковых швах не обнаружено. Микроструктура металла в околошовной зоне и в районе швов в обоих случаях удовлетворительная. При проведении рентгенофлуорисцентного анализа сварных соединений выявлено незначительное повышенное содержание хрома. Повышенное содержание кремния в сварном соединении очевидно связано с недостаточным качеством подготовки поверхности. При проведении механических испытаний сварного шва разрушение образца происходит по основному металлу, что свидетельствует об удовлетворительных механических свойствах шва. Микроструктура металла в околошовной зоне и зоне швов в обоих случаях в пределах нормы.

Общая сумма финансовых затрат, которые несет энергогенерирующее предприятие во время повреждения поверхностей нагрева (отказов), которые приводят к аварийной остановке энергоблока, без учета недополучения прибыли составляет 1011000 грн. Таким образом, учитывая порядок сумм штрафов через отказы на поверхностях нагрева энергоблоков ТЭС, которые могут достигать нескольких миллионов гривен, внедрение технологии напыления имеет значительный положительный экономический эффект, а именно затраты на внедрение новой технологии в 1,5...2,0 раза ниже по сравнению с убытками, понесенными ТЭС во время аварийных остановов. Также электродуговое напыление позволит продлить срок эксплуатации поверхностей нагрева.

Выводы

В работе исследовано применение метода электродугового напыления (металлизации) для повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС.

По данным, полученным о механическом, химическом и структурном состоянии металла трубы и слоя покрытия можно сделать вывод о позитивном опыте внедрения метода электродугового напыления как перспективного и высокоэффек-

тивного метода повышения надежности работы энергетического оборудования.

Несмотря на довольно большой объем работ, проводимых по напылению, все же имеются вопросы, довольно слабо проработанные, к их числу относится исследование и применение метода металлизации в условиях высокотемпературной газовой коррозии поверхностей нагрева нижней радиационной части (НРЧ), разработка отдельных инструкций и нормативных документов.

Список литературы

1. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С., Крыленко А.В. (2012) Особенности деградации структуры и механические свойства элементов печного и теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации. *Наука и техника*, **1**, 16–20.
2. Som Dutt Sharma S. D., Saluja R., Moeed K. M. (2013) A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel. *International Journal of Technical Research and Applications*, **1**, **2** (may-june), 05–07.
3. Хромченко Ф.А. (2005) *Сварочные технологии при ремонтных работах*. Интернет Инжиниринг.
4. Яценко В.П. (2006) Прогнозування ерозійного зношування теплообмінних поверхонь котельного устаткування. *Проблеми загальної енергетики*, **3**, 81–85.
5. Шрайбер А.А., Яценко В.П. (2008) Моделирование абразивного износа конвективных теплообменных поверхностей котла. *Проблеми загальної енергетики*, **17**, 37–40.
6. Корж В.М. (2005) *Газотермічна обробка матеріалів*. Київ, Екотехнологія.
7. Лашенко Г.И. (2012) *Современные технологии сварочного производства*. Київ, Екотехнологія.
8. Шатов А.П. (2009) *Сварка и ремонт металлических конструкций с противокоррозионными покрытиями*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
9. (1987) И 34-70-027-87 *Инструкция по восстановлению изношенных и защите новых гибов и прямых участков труб поверхностей нагрева котлов высокого давления методом газопорошковой наплавки*. Москва, Союзтехэнерго.
10. Гречнева М.В., Гоппе Г.Г. (2015) Газопорошковое напыление труб поверхностей нагрева котлоагрегатов тепловых электрических станций. *Вестник ИрГТУ*, **11**(**1**), 23–27.
11. Перспективні науково-технічні розробки (2017) *Енергетика та енергоефективність*. Київ, Видавничий дім «Академперіодика» НАН України.
12. (2009) ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 *Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия*.
13. (2004) ТИ 00130044.25101.00549 *Нанесения защитного покрытия на змievки водяного економайзера та екранні*

трубы котла ТП-100. ДП «Львівське конструкторське бюро».

14. Ruff A.W., Wiederhorn S.M. (1979) *Erosion by Solid Particle Impact*, **1**, 44. New York, Academic Press, 69-126.
15. РД.15.027-89 *Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций*

References

1. Panteleenko, F.I., Snarsky, A.S., Krylenko, A.V. (2012) Specifics of structure degradation and mechanical properties of components of furnace and heat-and-power engineering equipment after long-term operation. *Nauka i Tekhnika*, **1**, 16-20 [in Russian].
2. Som Dutt Sharma, S.D., Saluja, R., Moeed, K.M. (2013) A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel. *Int. J. of Technical Research and Applications*, **1**, **2** (May-June), 5-7.
3. Khromchenko, F.A. (2005) *Welding technologies in repair works*. Internet Engineering [in Russian].
4. Yatsenko, V.P. (2006) Prediction of erosion wear of heat exchange surfaces of boiler equipment. *Problemy Zagalnoi Energetyky*, **3**, 81-85 [in Ukrainian].
5. Shrajber, A.A., Yatsenko, V.P. (2008) Modeling of abrasive wear of convective heat exchange surfaces of boiler. *Ibid.*, **17**, 37-40 [in Ukrainian].
6. Korzh, V.M. (2005) *Thermal processing of materials*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
7. Lashchenko, G.I. (2012) *Modern technologies of welding production*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
8. Shatov, A.P. (2009) *Welding and repair of metal structures with corrosion-resistant coatings*. Moscow, Bauman MG TU [in Russian].
9. (1987) I 34-70-027-87: *Instruction on reconstruction of worn pipe bends and protection of new bends and straight sections of pipes of heating surfaces of high-pressure boilers by method of gas powder surfacing*. Moscow, Soyuztekhnenergo [in Russian].
10. Grechneva, M.V., Goppe, G.G. (2015) Gas powder spraying of pipes of heating surfaces of boiler units of thermal power stations. *Vestnik IrGTU*, **11**(**1**), 23-27 [in Russian].
11. (2017) Advanced scientific and technical developments. Power engineering and power efficiency. Kyiv, Akadempriodika [in Ukrainian].
12. (2009) TU 14-3-460:2009/TU U 27.2-05757883-207:2009: *Steel seamless pipes for boilers and pipelines. Technical specification* [in Russian].
13. (2004) ТИ 00130044.25101.00549: *Deposition of protective coating on water economizer coils and waterwall tubes of boiler TP-100*. Lviv, DP LKB [in Ukrainian].
14. Ruff, A.W., Wiederhorn, S.M. (1979) *Erosion by solid particle impact*. New York, Academic Press, 69-126.
15. RD.15.027-89: *Welding, heat treatment and control of pipe systems of boilers and pipelines in erection and repair of equipment of power stations* [in Russian].

ГАЗОПОРШКОВЕ НАПИЛЕННЯ ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

А.В. Грузевич^{1,2}, Д.А. Дереча^{2,3}

¹Трипільська ТЕС. 08720, м. Українка

²Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського 36, б

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

У роботі запропоновано напылення як перспективний та високоефективний метод підвищення надійності роботи енергетичного обладнання теплоелектростанцій. Оскільки основним видом зносу трубних елементів енергетичного обладнання теплоелектростанцій є золотий знос і корозія, то для підвищення їх надійності, терміну служби і працездатності запропоновано використовувати електродугове напылення за допомогою матеріалу ПП 70Х10РЗЮ5 як метод

газотермічної модифікації поверхонь нагріву. Метою роботи є дослідження ефективності застосування напилення для підвищення надійності роботи енергетичного обладнання теплоелектростанцій. Напилення поверхонь нагріву здійснювалося на двох теплових електростанціях ПАТ «Центрэнерго» у 2013 р. Техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження технології напилення дозволяє в 1,5...2,0 рази знизити витрати в порівнянні зі збитками, понесеними ТЕС в разі аварійних відключень і підвищити імовірно ресурс служби обладнання в 1,4 рази. Бібліогр. 15, табл. 7, рис. 12.

Ключові слова: напилювання, енергетичне обладнання, труби, згини, надійність, котли, економайзер, теплоелектростанція

GAS-POWDER SPRAYING AS A HIGH-PERFORMANCE METHOD OF INCREASE OF OPERATION RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT

A.V. Hruzevych^{1,2}, D.A. Derecha^{2,3}

¹Trypilska TPP. 08720, Ukrainka. E-mail:Gruzevich@bigmir.net

²Institute of Magnetism of NAS of Ukraine and MES of Ukraine. 36b Acad. Vernadskii Blvd., 03142, Kyiv, Ukraine

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

57 Pobedy Ave., 03056, Kyiv.

A work proposes spraying as a perspective and high-performance method for increasing the reliability of work of TPP power equipment. The main type of wear of tubing elements of TPP power equipment is ash erosion and corrosion. Therefore, in order to increase their reliability, operation life and working capacity it was proposed to use electric-arc spraying using PP 70Kh10RZYu5 material as a method of gas-thermal modification of heating surfaces. The aim of work is investigation of efficiency of spraying application for increasing the reliability of operation of TPP power equipment. Spraying of the heating surfaces was carried out on two thermal power plants of PJSC «Centrenergo» in 2013. A feasibility study showed that implementation of spraying technology allows 1.5 -2.0 times decrease of expenses in comparison with loss incurred by TPP in the case of emergency shutdowns and rise approximately 1.4 time service life. 15 Ref., 7 Tabl., 12 Fig.

Keywords: spraying, power equipment, tubes, bends, reliability, boilers, economizers, thermal power plant

Поступила в редакцію 27.02.2019



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Международная Ассоциация «Сварка»

Девятая международная конференция

ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

9 – 13 сентября 2019 г., Одесса

Председатель программного комитета академик И.В. Кривцун

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

Оргкомитет

ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua | <http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019>

Міжнародна конференція

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ У ЗВАРЮВАННІ І СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ

23–24 травня 2019 р.

м. Київ, Україна

Напрямки роботи конференції

- Фізико-хімічні процеси
- Міцність, надійність та ресурс
- Інноваційні технології
- Комп'ютерні технології
- Контроль якості
- Нанотехнології
- Обладнання та джерела живлення
- Формування структури і властивостей з'єднань та матеріалів

Контакти: 03056, м. Київ, вул. Дашавська 6/2,

кафедра зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського

Тел.: +380-44-204-92-58; 204-82-40; 204-99-31; факс: +380-44-204-82-40; E-mail: polywedconf@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ОБЛАСТІ СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ (Огляд)

М.В. Юрженко

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

Трубопроводи для транспортування природного газу, холодного водопостачання та водовідведення є одним з найбільш значимих елементів міської та селищної інфраструктури. Трубопроводи з полімерних матеріалів, зокрема, поліетилену, є сучасною альтернативою сталевим трубопроводам, які впродовж 15–20 років експлуатації руйнуються під дією хімічної та електрохімічної корозії. У світі і в Україні зокрема майже усі нові розвідні трубопроводи для газопостачання, холодного водопостачання та водовідведення будують з поліетиленових труб. Широкого застосування в Україні, особливо у великих містах, набула практика заміни старих зношених сталевих трубопроводів новими поліетиленовими та реновації методом затягування поліетиленової труби у сталевий трубопровід. Одним з найбільш технологічних методів з'єднання поліетиленових труб практично усього діапазону зовнішніх діаметрів є зварювання нагрітим інструментом встик. Обладнання для цього методу зварювання на даний час в Україні не виробляється. Імпортні установки для стикового зварювання поліетиленових труб працюють за давно розробленою та звичною технологічною схемою, деякі елементи якої, у зв'язку з удосконаленням самих полімерних матеріалів, можуть бути переглянуті та спрощені при збереженні високої якості кінцевих зварних з'єднань. Метою роботи є огляд сучасного стану в області стикового зварювання нагрітим інструментом виробів з пластмас, в першу чергу поліетиленових труб, та найбільш цікавих з технологічної точки зору його модифікацій. Бібліогр. 28, рис. 5.

Ключові слова: стикове зварювання нагрітим інструментом, пластмаси, поліетиленові труби.

З'єднання поліетиленових труб практично є завершальною та, з іншого боку, найбільш відповідальною стадією усього складного технологічного ланцюга будівництва технологічного трубопроводу. Світовий та вітчизняний досвід доводять, що у більшості випадків такі з'єднання виконуються за допомогою зварювання, зокрема, зварювання нагрітим інструментом встик. Зварні шви відіграють вирішальну роль у забезпеченні надійності роботи усього поліетиленового трубопроводу, тому в усьому світі приділяється велика увага дослідженням технологічних особливостей таких швів [1–3].

Згідно з діючою в Україні нормативною документацією, поліетиленові труби для подачі холодної води можна з'єднувати між собою зварюванням нагрітим інструментом встик, врозтруб, терморезисторним зварюванням, а також механічно за допомогою спеціальних затискних деталей [4]. Поліетиленові труби для газопроводів дозволяється з'єднувати між собою тільки двома способами зварювання — нагрітим інструментом встик та терморезисторним [5]. Оскільки механічні з'єднання напірних поліетиленових труб на практиці застосовують досить рідко, основним методом з'єднання таких труб при будівництві технологічних трубопроводів є зварювання. Усі три згаданих вище способи зварювання поліетиленових труб відомі давно, технологія та обладнання для них досить добре розроблені [6–8]. Однак зварю-

вання врозтруб та терморезисторне потребують використання спеціальних з'єднувальних деталей — муфт, які здорожчують будівництво трубопроводів, збільшують зовнішні розміри стику. Крім того, ці способи зварювання потребують досить точного дотримання геометричної форми та розмірів труби і з'єднувальної деталі через великий ризик утворення непроварів або утворення пор при осіданні матеріалу зварного шва [9].

Зварювання нагрітим інструментом встик на даний час є найбільш універсальним способом з'єднання поліетиленових труб і може застосовуватися для більшості типорозмірів труб, за винятком тонкостінних, з товщиною стінки менше 5 мм. В останні роки ця технологія постійно розвивається та удосконалюється, застосовується для зварювання труб великого та надвеликого діаметру та труб з нових марок поліетиленової композиції [10]. Обладнання для цього способу зварювання демонструє тенденцію до диференціації конструкції в залежності від призначення. Для зварювання в польових умовах використовують потужні та жорсткі машини з чотирма затискачами, в цехових умовах зварюють, як правило, короткі відрізки труб за допомогою стаціонарних машин з поворотними затискачами, для ремонтних та монтажних робіт використовують облегшені зварювальні пристрої [11].

За останні 30 років відбувся стрімкий розвиток трубних марок поліетилену, які пройшли еволю-

цію від ПЕ 32 до ПЕ 100. На практиці постійно виникає потреба зварити між собою труби, виготовлені із «старих» та «нових» типів поліетиленів. Дуже часто будівельники помилково вважають поліетилен різних градацій як подібні та рівноцінні, хоча вони суттєво різняться між собою молекулярною структурою та фізичними властивостями [12]. Експериментально підтверджено, що довготривала якість зварних з'єднань поліетиленових труб, що працюють під навантаженням, залежить від мікро- та макромолекулярної структури матеріалу, особливості формування якої необхідно окремо вивчати для кожної пари полімерів, що зварюються. Якість зварного з'єднання поліетиленових труб визначається, головним чином, теплофізичними та реологічними процесами в зоні зварного шва. При стиковому зварюванні нагрітим інструментом характерним є потужна течія розплавленого матеріалу, який в процесі осадження витискається із середини з'єднання назовні в грат. Кінетичні закономірності цього процесу залежать від основних параметрів процесу зварювання та, з іншого боку, суттєво залежать від властивостей поліетиленової композиції.

Підведення теплової енергії, необхідної для зварювання термопластичних полімерів, простіше усього здійснюється шляхом безпосереднього контакту поверхні деталі, що зварюється, з нагрітим інструментом. Найчастіше таким способом з'єднують одновісно направлені деталі встик, але застосовують цей спосіб і для інших типів з'єднання. Через спосіб передачі теплової енергії цей вид зварювання часто називають тепловим. У випадках, якщо безпосередній контакт з поверхнею з'єднання неможливий, нагрівають зовнішню поверхню деталей – так зване зварювання непрямым нагрівом [13].

Спосіб зварювання нагрітим інструментом встик (прямим нагрівом) широко застосовується на практиці завдяки простоті технологічного процесу зварювання, обладнання та оснастки. Головним чином, цей спосіб зварювання застосовують при будівництві полімерних трубопроводів (найбільше – поліетиленових) для транспортування горючого газу та води. Інші сфери застосування теплового зварювання встик – з'єднання пластмасових профілів при виготовленні віконних рам, зварювання стрижнів, плит та інших деталей при виготовленні різних конструкцій із пластмас. В останні роки цей спосіб зварювання з використанням спеціального обладнання використовується для зварювання виробів з інженерних пластмас в автомобільній та інших видах промисловості [14]. Використовують стикове зварювання нагрітим

інструментом і для зварювання композиційних полімерних матеріалів [15].

Традиційно, процес зварювання нагрітим інструментом встик відбувається з заданою величиною тиску при осадженні. Типова діаграма зміни робочого тиску протягом часу зварювання приведена на рис. 1, а.

При зварюванні пластмас, які мають широкий температурний інтервал перебування у стані розплаву з низьким рівнем в'язкості, традиційна технологія зварювання встик з контрольованим робочим тиском виправдана (рис. 1, а), оскільки при досягненні заданої величини тиску в процесі осадженні гарантовано вдається витиснути розплавлений матеріал в грат.

При зварюванні пластмас, в'язкість яких суттєво змінюється в залежності від температури, застосовують технологію зварювання нагрітим інструментом з фіксованою величиною осадки (рис. 1, б), оскільки при охолодженні поверхонь, що зварюються, нижче оптимального рівня в'язкість розплаву може зрости настільки, що встановлений рівень робочого тиску не зможе забезпечити витискання розплаву при осадженні та нормальне формування шва. В цьому випадку спеціальними пристроями (як правило, упорами) контролюється як величина оплавлення поверхні деталей при нагріванні, так і величина осадки, тобто зони оплавлення при витисканні нагрітого розплаву в грат. Ці ж упори визначають остаточний розмір зварного шва після зварювання. При такій технології, в залежності від конкретних умов зварювання, може змінюватись величина робочого тиску, оскільки розплав з меншою в'язкістю буде витискатись меншим тиском і навпаки. Аналогічно, при використанні традиційної технології існує невизначеність величини осадки, яка також буде залежати від в'язкості розплаву полімеру.

Чистота поверхонь деталей, що зварюються, — один з основних факторів, що забезпечують якість з'єднання при зварюванні нагрітим інструментом встик. Забруднення погіршує цілісність зварного шва, а сторонні включення можуть діяти як концентратори напружень, що стає передумовою для виникнення тріщин при навантаженні. Оскільки більшість зварних з'єднань полімерних труб виконуються у польових умовах, загроза забруднення таких швів особливо значна. Розрізняють такі види забруднень поверхні труб: сильні забруднення грунтом, смолою та іншим брудом, незначні забруднення пилом, жирові та масляні сліди, волога на поверхні, окислення поверхні атмосферним киснем, ерозія поверхні під дією сонячного ультрафіолетового випромінювання. Автоматизація процесу зварювання

нагрітим інструментом повинна передбачати максимально можливе очищення поверхонь деталей перед зварюванням [16].

Прямий характер нагріву поверхонь та їх безпосередній контакт при осадженні висуває підвищені вимоги до геометрії торців труб, що зварюються. Тому, згідно з вимогами нормативів, закріплені та відцентровані кінці труб і деталей перед зварюванням піддають механічній обробці — торцюванню з метою вирівнювання поверхонь, що зварюються, безпосередньо у зварювальній установці. Максимально допустима величина зазорів між торцями, що зварюються, спеціально обумовлюється в залежності від товщини стінки труби [5]. Пристрій для торцювання зазвичай являє собою складний електромеханічний пристрій зі спеціально заточеними ножами, що вирівнюють поверхні торців труб. Процес механічного торцювання труб суттєво ускладнює підготовку до зварювання, особливо із збільшенням зовнішнього діаметру труб, що зварюються. Наявність складного механічного торцювача, який треба постійно обслуговувати та налаштовувати, значно збільшує вартість обладнання для стикового зварювання.

Після відповідної підготовки торців труб розпочинається безпосередньо зварювання стиків. Використання зовнішнього інструменту для нагріву поверхонь, що з'єднуються, передбачає переривчастість процесу стикового зварювання труб. Зазвичай виділяють такі основні стадії процесу, що також поділяються на етапи [17] (рис. 1):

- розігрів поверхонь торців труб, що включає етапи оплавлення t_1 та нагріву t_2 ;
- технологічна пауза t_3 , яка необхідна для видалення нагрівального інструменту;
- осадження деталей, що зварюються t_4 з поступовим збільшенням робочого тиску та охолод-

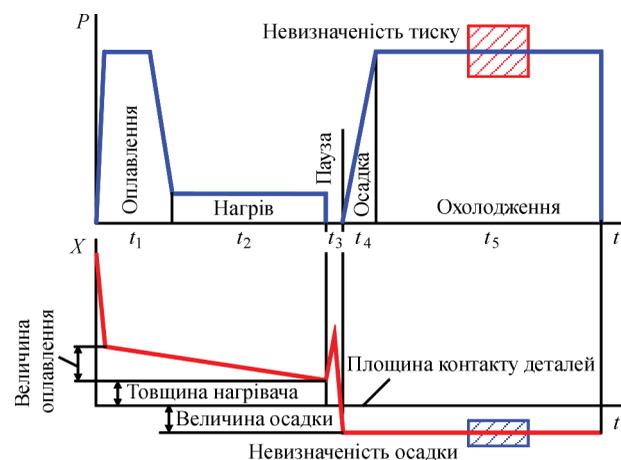


Рис. 1. Часові діаграми тиску (P) та переміщення торців деталей (X) при різних технологіях процесу зварювання пластмас (в тому числі поліетиленових труб) нагрітим інструментом встик: *a* — зварювання з контрольованим тиском; *б* — зварювання з контрольованою осадкою

ження зварного шва під тиском t_5 до його остаточного формування.

На етапі оплавлення торці труб входять у безпосередній контакт з поверхнею нагрівального інструменту. Температура нагрівача заздалегідь встановлюється вищою за температуру плавлення полімерного матеріалу, з якого виготовлені вироби, тому процес оплавлення торців починається одразу. Прогрів торців труб здійснюється виключно за рахунок теплопередачі з поверхні нагрівального інструменту та поступової теплопровідності полімерного матеріалу вглиб виробу. Процес оплавлення торців необхідний для забезпечення ефективного рівномірного їх прогріву при щільному контакті поверхонь труб і нагрівального інструменту. На цьому етапі за рахунок розплавлення полімерного матеріалу зникають усі мікронерівності поверхонь торців, а також навіть мінімальний зазор між їх площинами, який міг залишитися після механічного торцювання. Для прискорення процесу оплавлення торці труб притискаються до нагрівального інструменту з максимальним робочим тиском $0,2 \pm 0,02$ МПа (рис. 1, *a*), що викликає активне витискання розплаву полімеру назовні. Критерієм завершення рівномірного оплавлення вважається утворення невеликих рівномірних валиків первинного ґрату по периметрам обох торців труб, що зварюються [7].

Вважається, що в процесі оплавлення торців труб, прогрівання масиву полімеру в глибину практично не відбувається, оскільки усе тепло, яке передане нагрівачем витрачається на розплавлення нерівностей поверхонь труб. По завершенні етапу оплавлення t_1 робочий тиск на труби зменшується до мінімальної величини $0,01 \dots 0,02$ МПа та починається етап нагріву t_2 , тривалість якого окремо визначається для кожного типорозміру та матеріалу труби. На етапі прогріву розплавлення матеріалу практично припиняється, а відбувається його нагрівання в глибину за рахунок його теплопровідності.

Прогрівання масиву стінки труби відбувається нерівномірно, найменша температура досягається в центрі, а найбільш прогрітими стають зовнішня та внутрішня поверхні труби. Це викликано тим, що поверхонь труби досягає не тільки енергія лінійного теплового потоку від нагрівача, а й додаткова тепла енергія від витиснутого у ґрат розплаву та від випромінювання поверхні нагрівача. По завершенні етапу нагріву на поверхні кожного з торців труб повинні утворитись невеликі рівномірні шари в'язкоплинного матеріалу, які на подальших етапах утворять зварне з'єднання [18].

Температура нагрівального інструменту та час прогріву є основними параметрами при зварюван-

ні нагрітим інструментом встик. Робоча зона повинна бути захищеною від охолодження вітром та низькою температурою, а при зварюванні в умовах підвищеної температури — захищена від перегріву та дії прямих сонячних променів. Поверхня нагрівального інструменту не повинна мати подряпин та інших дефектів на антиадгезійному покритті, температуру його необхідно перевіряти на різних ділянках робочої поверхні. Робочу температуру нагрівального інструменту рекомендовано зменшувати на 5...10 % зі зростанням товщини труб, що зварюються [19].

В деяких випадках для зменшення об'єму розплавленого матеріалу при нагріві використовують так званий високотемпературний нагрівальний інструмент, з температурою на 100...150 °C вище температури плавлення полімеру [20]. У цьому разі, для запобігання деструкції полімеру, тривалість прогріву значно знижується.

Проміжний етап процесу стикового зварювання нагрітим інструментом – технологічна пауза t_3 . Під час паузи торці труб від'єднуються від нагрівального інструменту, він видаляється із зони зварювання, а труби зближуються до контакту поверхонь торців. Під час паузи нагрітий матеріал охолоджується, контактує з атмосферою та може окислюватись, оплавлені поверхні можуть забруднюватись пилом та вологою. Тому тривалість паузи намагаються по можливості зменшити. Максимально допустима тривалість паузи встановлюється нормативними документами у межах 3...6 с в залежності від типорозміру труби [5]. Після безпосереднього контакту поверхонь торців труб починається завершальна стадія процесу стикового зварювання — осадження.

В процесі осадження за рахунок робочого тиску посилюється фізичний контакт оплавлених поверхонь, що створює передумови для виникнення міжмолекулярної взаємодії між матеріалами деталей та утворення зварного з'єднання. Під тиском відбувається видавлювання розплавленого матеріалу із зони зварювання та утворення вторинного (зварювального) ґрату. З течією розплаву із шва видаляються пори, забруднення та інші дефекти, що могли утворитись на попередніх етапах процесу. Тривалість етапу осадження t_4 , що визначає швидкість зростання робочого тиску, обумовлюється нормативними документами та збільшується зі зростанням товщини стінки труби. Завелика швидкість осадження може викликати надмірні напруження в зоні зварювання та сприяти утворенню дефектів швів [9] (рис. 2).

Якість зварювання значною мірою визначається реологічними процесами, що протікають при осадженні в зоні зварного з'єднання. Вважається,

що чим менша в'язкість полімеру, тим легше він зварюється. Швидкість переміщення деталей при осадженні обернено пропорційна середній в'язкості розплаву [21]. Допустимим є зварювання труби із поліетиленів різних типів, якщо показники текучості розплавів їх відрізняються мало [22].

Після осадження починається останній етап утворення зварного з'єднання — повільне охолодження зварного шва при збереженні робочого тиску, що триває декілька хвилин. Наявність тиску сприяє релаксації напружень і запобігає утворенню тріщин та інших дефектів при усадці матеріалу. Охолодження нагрітих ділянок у полімерних матеріалах відбувається повільніше, ніж у металах, оскільки теплопровідність цих матеріалів набагато нижча. Зона термічного впливу для швів, які зварені нагрітим інструментом встик розташована поблизу зварного з'єднання. Тому керувати температурою в зоні зварювання можливо додатковим нагріванням або охолодженням зон термічного впливу з використанням додаткового інструменту [23]. По завершенні етапу охолодження тривалістю t_5 зварне з'єднання вважається повністю сформованим та видаляється зі зварювального обладнання.

Відзначається, що для забезпечення високої якості зварних швів полімерних трубопроводів необхідне точне дотримання усіх рекомендованих параметрів процесу зварювання. Однак навіть за цих умов можливий збіг обставин, що призводить до виникнення дефектності зварних з'єднань. Несплавлення у зварному стиковому з'єднанні виникає при деструкції частини матеріалу через аномально високу температуру нагрівача, при переохолодженні матеріалу під час технологічної паузи, а також внаслідок забруднення. Окремі невеликі порожнини та пори всередині швів можуть утворюватись в результаті процесів усадки, що викликаються нерівномірним прогрівом масиву полімерного матеріалу (рис. 3). Неможливість усадки приповерхневих шарів зварних з'єднань призводить до виникнення тріщин як у площині

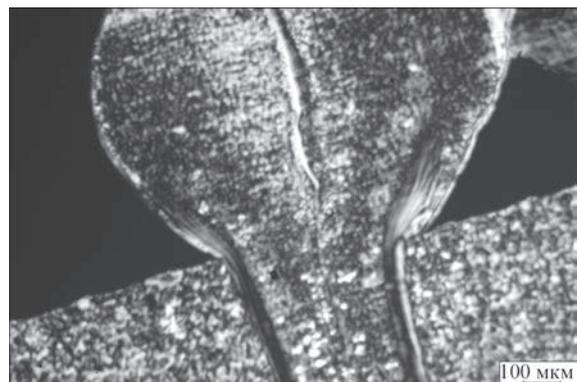


Рис. 2. Дефект у вигляді прохідної тріщини у зварному ґраті та шві

сплавлення, так і на ділянках під ґратом по межі між розплавом та основним матеріалом [9].

Однією з технологічних умов отримання якісних стикових швів є облаштування зручного робочого місця для зварювальників. На практиці цей принцип нерідко порушується, особливо при виконанні різного роду ремонтних робіт. Типовими помилками є занадто малі розміри котлованів та траншей, що не дозволяє належним чином налаштувати монтажне обладнання та виставити деталі, що з'єднуються. Відсутність надійної опори для центратора, перевищення нормативного часу технологічної паузи може стати причиною непроварів та інших дефектів зварних швів [24]. Таким чином, компактність, надійність роботи та зручність доступу є одними з основних вимог до обладнання, яке призначене для зварювання полімерних трубопроводів.

В даний час будівельні організації України використовують такі обладнання для зварювання полімерних труб провідних європейських та азіатських виробників, як Georg Fischer (Швейцарія), Widos, Rothenberger (Німеччина), Ritmo (Італія), Kamitech, NowaTech (Польща), Tugan Makina (Туреччина), Times Asia Group Ltd. (Китай) і т. п. (рис. 4). Виробляють подібне обладнання і в країнах СНГ — Росії, Білорусі, Казахстані [25]. Слід відзначити, що обладнання для зварювання полімерних труб нагрітим інструментом встик усіх виробників призначено для реалізації традиційної технологічної схеми зварювання та побудовано за однаковою компоновочною схемою з гідравлічним приводом осадження. Для зварювання труб малого діаметру використовують невеликі установки з ручним механічним приводом. Відрізняються між собою установки різних виробників тільки конструктивними особливостями та якістю виконання окремих вузлів та блоків.

Важливою тенденцією розвитку сучасної техніки зварювання полімерних труб є диференціація обладнання за призначенням. В залежності від видів зварювальних робіт, обладнання для зварювання нагрітим інструментом встик може мати різні конструктивні рішення та різну допоміжну оснастку. Центратори зварювальних установок можуть мати різну кількість та потужність затискачів, оснащуватись гідравлічним, пневматичним або механічним приводами переміщення труб. Для зварювання у по-

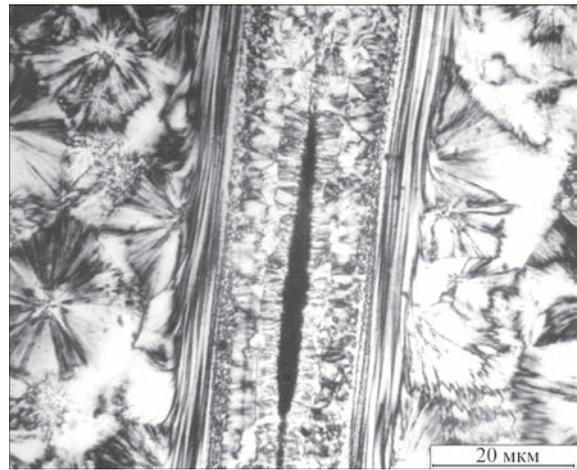


Рис. 3. Дефект у вигляді порожнини у зварному шві

льових умовах застосовують жорсткі центратори з чотирма затискачами, а цехові машини, як правило, мають полегшену конструкцію та можуть бути оснащені поворотними затискачами. Взаємозаміна зварювальних установок різного призначення, як правило, недопустима [11]. Відзначається ефективність в деяких випадках використання для зварювання встик поліетиленових труб обладнання з пневмоприводом, яке має меншу вартість та збільшений діапазон допустимих кліматичних умов [26] (рис. 5).

Світові тенденції розвитку технології та обладнання для зварювання нагрітим інструментом — це його застосування для зварювання нових полімерних матеріалів, розширення діапазону робочих температур нагрівачів тощо. Використовують нагрівальні інструменти «звичайної» температури (до 270 °С), підвищеної температури (350...450 °С) та інструменти надвисокої темпера-



Рис. 4. Установки для стикового зварювання полімерних труб нагрітим інструментом різних європейських виробників: а — Georg Fischer; б — Widos; в — Rothenberger; г — Ritmo

тури 500...550 °С з можливістю одночасного нагрівання інфрачервоним випромінюванням [10].

Модифікація способу зварювання нагрітим інструментом встик, що називають зварюванням за переміщенням, все ширше застосовується для зварювання плоских деталей з полімерів різних видів [27, 28]. Глибина оплавлення на першій фазі процесу нагріву визначається спеціальними механічними опорами на нагрівальному інструменті. Так само, на етапі осадження механічні опори обмежують відносно переміщення торців деталей попередньо визначеною величиною. Таким чином, розмірами зварного з'єднання, що утворюються після формування шва, можна керувати з великою точністю.

Незважаючи на тривалий історичний період використання способу зварювання нагрітим інструментом та простоту технології, актуальним вважається суттєве удосконалення та розширення сфер застосування цього методу. Традиційними недоліками способу зварювання нагрітим інструментом встик вважаються обмежені можливості керування процесом та отримання даних про хід його у реальному часі, завеликий час тривалості етапів процесу. В даний час перспективними вважаються зварювальне обладнання, що дозволяє операторам точно керувати переміщенням окремих частин, температурою поверхонь, що нагріваються, та зусиллям, що прикладається до деталей [20]. Нагрівальний інструмент може мати різноманітні форми в залежності від конфігурації зварного з'єднання. Пристрої затискання деталей стають взаємозамінними та забезпечують точне вирівнювання та утримання їх при зварюванні. Вони можуть функціонувати як в горизонтальній, так і в вертикальних площинах. Підвищенню швидкості дії обладнання для зварювання нагрітим інструментом сприяє застосування для керування переміщенням деталей серводвигунів. Для контролю в процесі зварювання основних параметрів, таких, як зусилля, швидкість, відстань, температура, необхідно застосування сучасного комп'ютерного апаратного та програмного забезпечення.

Нерівномірний розподіл температури по верхній нагрівального інструменту може негативно впливати на кінцеву якість зварного з'єднання. Традиційні конструкції нагрівачів зазвичай забезпечують можливість регулювання температури в одній — двох точках робочої зони. Деякі сучасні нагрівальні інструменти мають на поверхні до 9 точок окремого програмування температури.

Швидкість переміщення деталей при зварюванні — ще один важливий параметр процесу, що впливає на якість зварного шва. Зазвичай регла-



Рис. 5. Установка з пневмоприводами для стикового зварювання полімерних труб виробництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

ментується тільки швидкість зростання величини робочого тиску, а для процесу формування зварного з'єднання важливими є абсолютна величина швидкості переміщення, програмовані прискорення або уповільнення руху у визначені моменти часу. Традиційні зварювальні установки мають гідравлічні або пневматичні приводи, що практично не дають можливості контролю швидкості руху. Забезпечити програмування та контроль параметрів руху деталей при зварюванні дозволяє використання сучасних сервоприводів.

Таким чином, стикове зварювання нагрітим інструментом виробів з пластмас, в першу чергу полімерних труб, було і залишається одним з найбільш розповсюджених і популярних способів зварювання. Однак удосконалення самих полімерних матеріалів і поява нових фундаментальних знань створює передумови до спрощення технології зварювання, проблематика якого є актуальною у сучасному полімерному світі.

Список літератури

1. Qi F., Huo L., Zhang Y., Jing H. (2004) Study on Fracture Properties of High-density Polyethylene (HDPE) Pipe. *Key Engineering Materials*, 261-263, 153-158.
2. Leskovic K., Kollar M., Barczy P. (2006) A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes. *Materials Science and Engineering*, 9, 138-143.
3. Adnan A. (2013) An analysis of electro-melting and hot element welding methods' safety used to join PE natural gas pipes. *International Journal of electronics, mechanical and mechatronics*, 3, 2, 493-504.
4. ДСТУ-Н Б В.2.5-40:2009 *Проектування та монтаж мереж водопостачання та каналізації з пластикових труб*.
5. ДБН В.2.5-41:2009. *Газопроводи з поліетиленових труб. Проектування, будівництво*.
6. Шестопад А.Н., Васильев Ю.С., Тарасенко О.В., Тарногородский В.П. (1990) *Справочник по сварке и склеиванию пластмасс*. Шестопад А.Н., Кораб Г.Н. (редакторы). Киев, Техника.
7. Волков С.С. (2001) *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия.
8. Катаев Р.Ф. (2008) *Сварка пластмасс. Учебное пособие*. Екатеринбург, Изд-во УПИ.
9. Кораб Н.Г., Минеев Э.А. (2007) Критические замечания по способам сварки труб из термопластичных полимерных материалов. *Полимерные трубы – Украина*, 1, 53-55.

10. Grewell D., Benatar A.S. (2007) Welding of plastics: Fundamentals and New Developments. *International Polymer Processing XXII, Munich*.
11. Кимельблат В.И. (2014) Сварка ПЭ труб – тенденции развития. *Пластикс*, **6**, 38–43.
12. Каргин В.Ю., Ставская Т.В. (1999) К вопросу сварки полиэтиленовых труб ПЭ 63, ПЭ 80 и ПЭ 100. *Полимергаз*, **2**, 40–42.
13. Катаев Р.Ф. (2008) *Сварка пластмасс. Учебное пособие*. Екатеринбург, УПИ
14. Комаров Г.В., Гончаренко В.А. (2011) Новые технологии и оборудование для сварки полимерных материалов. Часть 1. *Полимерные материалы*, **1**, 18–22.
15. Шадрин А.А., Криваткин А.М. (1993) Сварка встык соединений композиционного материала ПА6-ЛТ-20. *Автоматическая сварка*, **1**, 42–44.
16. О'Коннор Крис (2012) Полиэтиленовые трубопроводы: как избежать дефектов сварки. *Газ России*, **3**, 48–58.
17. Шестопал А.Н., Кораб Г.Н., Васильев Ю.С. и др. (1990) *Справочник по сварке и склеиванию пластмасс*. Киев, Техника.
18. Гончаренко В.А. (1995) Плавление пластины из термопласта, прижатой к нагретому телу. *Новые материалы и технологии. Сб. тез. докл. Росс. НТК. «Композиционные, керамические, порошковые материалы и покрытия», 21–22 ноября 1995 г. Москва*. МГАТУ, сс. 32.
19. Akkurt Adnan (2013) An analysis of electro-melting and hot element welding methods' safety used to join PE natural gas pipes. *International Journal of electronics, mechanical and mechatronics*, **3**, 2, 493–504.
20. Кораб Г.Н., Вакулenco С.А., Савицкий А.А. (1986) Критерии выбора параметров при высокотемпературной сварке полиэтиленовых труб нагретым инструментом. *Автоматическая сварка*, **6**, 29–32.
21. Волков И.В., Кимельблат В.И. (2011) Роль реологических свойств ПЭ при выборе основных параметров сварки. *Вестник Казанского технологического университета*, **4**, 119–123.
22. Кимельблат В.И., Волков И.В., Глухов В.В. (2010) Оптимизация технологии контактной сварки встык. Учет свойств полимеров. *Полимерные трубы*, **2** (28), 32–36.
23. Старостин Н.П., Герасимов А.И. (2009) Сварка полимерных труб для газопроводов при низких температурах. *Нефтегазовое дело*, 25–27.
24. Прокопьев Н., Кимельблат В.И. (2015) Практические проблемы сварки полиэтиленовых труб. *Полимерные трубы*, **2** (8), 60–63.
25. Зуев М.А., Шешнев Д.А. (2014) Оборудование для сварки полиэтиленовых труб: опыт ремонта и обслуживания. *Газ России*, **2**, 74–75.
26. Нестеренко М.П., Гальчун А.М., Кондратенко В.Ю., Скок О.Г. (2013) Про ефективність використання обладнання з пневмоприводом для зварювання встык труб діаметром до 400 мм із кристаломорфних полімерів. *Доп. на міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє»*. Київ, 25–26 листопада 2013 р., сс. 47–48.
27. Stokes V. K. (1997) The hot-tool and vibration welding of acrylonitrile-butadiene-styrene. *Polymer Engineering and Science*, **37**, **4**, 372–377.
28. Stokes V. (2001) K. A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 3. *Polyetherimide. Polymer*, **4**, 775–792.
29. pipes. *Int. J. of Electronics, Mechanical and Mechatronics*, **3**(2), 493-504.
30. DSTU-N B V.2.5-40:2009: *Design and mounting of water-supply and sewerage systems from plastic pipes* [in Russian].
31. DBN V.2.5-41:2009: *Gas pipelines from polyethylene pipes. Design, construction* [in Russian].
32. Shestopal, A.N., Vasiliev, Yu.S., Tarasenko, O.V., Tarnogrodsky, V.P. (1990) *Reference book on welding and bonding of plastics*. Ed. by Shestopal, A.N., G.N. Korab. Kiev, Tekhnika [in Russian].
33. Volkov, S.S. (2001) *Welding and bonding of polymer materials*. Moscow, Khimiya [in Russian].
34. Kataev, R.F. (2008) *Welding of plastics*. In: *Manual*. Ekaterinburg, Izd-vo UPI [in Russian].
35. Korab, N.G., Mineev, E.A. (2007) Critical remarks on welding methods of pipes from thermoplastic polymer materials. *Polimernye Truby–Ukraina*, **1**, 53-55 [in Russian].
36. Grewell, D., Benatar, A.S. (2007) Welding of plastics: Fundamentals and new developments. *International Polymer Processing XXII, Munich*.
37. Kimelblat, V.I. (2014) Welding of PE pipes – tendencies of developments. *Plastics*, **6**(3), 38-43 [in Russian].
38. Kargin, V.Yu., Stavskaya, T.V. (1999) To problem of polyethylene pipes PE 63, PE 80 and PE 100. *Polimergaz*, **2**, 40-42 [in Russian].
39. Kataev, R.F. (2008) *Welding of plastics: Manual*. Ekaterinburg, UPI [in Russian].
40. Komarov G.V., Goncharenko, V.A. (2011) New technologies and equipment for welding of polymer materials. Pt 1. *Polimernye Materialy*, **1**, 18-22 [in Russian].
41. Shadrin, A.A., Krivatkin, A.M. (1993) Butt welding of joints of composite material PA6-LT-20. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 42-44 [in Russian].
42. O'Konnor Kris (2012) Polyethylene pipelines: How to avoid defects of welding. *Газ России*, **3**, 48-58 [in Russian].
43. Shestopal, A.N., Korab, G.N., Vasiliev, Yu.S. (1990) *Reference book on welding and bonding of plastics*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
44. Goncharenko, V.A. (1995) Melting of thermoplast plate pressed to heated body. New materials and technologies. In: *Abstr. of Papers of Russ. NTK. Direction: Composite, Ceramic, Powder Materials and Coatings (21-22 November 1995, Moscow)*. МГАТУ, **32** [in Russian].
45. Akkurt Adnan (2013) An analysis of electro-melting and hot element welding methods' safety used to join PE natural gas pipes. *Int. J. of Electronics, Mechanical and Mechatronics*, **3**(2), 493-504.
46. Korab, G.N., Vakulenko, S.A., Savitsky, A.A. (1986) Criteria of selection of parameters in high-temperature welding of polyethylene pipes by heated tool. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 29-32 [in Russian].
47. Volkov, I.V., Kimelblat, V.I. (2011) Role of rheological properties in selection of main welding parameters. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Un-ta*, **4**, 119-123 [in Russian].
48. Kimelblat, V.I., Volkov, I.V., Glukhov, V.V. (2010) Optimization of technology of resistance butt welding. Taking into account the polymer properties. *Polimernye Truby*. **2**(8), 32-36 [in Russian].
49. Starostin, N.P., Gerasimov, A.I. (2009) Welding of polymer pipes for gas pipelines at low temperatures. *Neftegazovoe Delo*, 25-27 [in Russian].
50. Prokopiev, N., Kimelblat, V.I. (2015) Practical problems of welding of polyethylene pipes. *Polimernye Truby*. **2**(8), 60-63 [in Russian].
51. Zuev, M.A., Sheshnev, D.A. (2014) Equipment for welding of polyethylene pipes: Experience of repair and maintenance. *Газ России*, **2**, 74-75 [in Russian].
52. Nesterenko, M.P., Galchun, A.M., Kondratenko, V.Yu., Skok, O.G. (2013) On efficiency of application of equipment with pneumatic actuator for butt welding of up to 400 mm diameter pipes from crystal amorphous polymers. In: *Proc. of Int. Conf. on Welding and Related Technologies – Present and Future (Ukraine, Kyiv, 25-26 November 2013)*, 47-48.

References

1. Qi, F., Huo, L., Zhang, Y., Jing, H. (2004) Study on fracture properties of high-density polyethylene (HDPE) pipe. *Key Engineering Materials*, **283**, 153-158.
2. Leskovic, K., Kollar, M., Barczy, P. (2006) A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes. *Mater. Sci. and Engin.*, **2**, 138-143.
3. Adnan, A. (2013) An analysis of electro-melting and hot element welding methods' safety used to join PE natural gas

27. Stokes, V.K. (1997) The hot-tool and vibration welding of acrylonitrile-butadiene-styrene. *Polymer Engineering and Science*, 37(4), 372-377.
28. Stokes, V. (2001) A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Pt 3: *Polyetherimide*. *Polymer*, 42, 775-792.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ (Обзор)

М.В. Юрженко

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

Трубопроводы для транспортировки природного газа, холодного водоснабжения и водоотведения являются одним из наиболее значимых элементов городской и поселковой инфраструктуры. Трубопроводы из полимерных материалов, в частности, полиэтилена, являются современной альтернативой стальным трубопроводам, которые на протяжении 15–20 лет эксплуатации разрушаются под действием химической и электрохимической коррозии. В мире и в Украине, в частности, почти все новые разводные трубопроводы для газоснабжения, холодного водоснабжения и водоотведения строят из полиэтиленовых труб. Широкое применение в Украине, особенно в больших городах, получила практика замены старых изношенных стальных трубопроводов новыми полиэтиленовыми и реновации методом затягивания полиэтиленовой трубы в стальной трубопровод. Одним из самых технологичных методов соединения полиэтиленовых труб практически всего спектра внешних диаметров является сварка нагретым инструментом встык. Оборудование для этого метода сварки в настоящее время в Украине не производится. Импортные установки для стыковой сварки полиэтиленовых труб работают по давно разработанной и привычной технологической схеме, некоторые элементы которой, в связи с совершенствованием самих полимерных материалов, могут быть пересмотрены и упрощены при сохранении высокого качества конечных сварных соединений. Целью работы является обзор современного состояния в области стыковой сварки нагретым инструментом изделий из пластмасс, в первую очередь полиэтиленовых труб, и наиболее интересных с технологической точки зрения его модификаций. Библиогр. 28, рис. 5.

Ключевые слова: стыковая сварка нагретым инструментом, пластмассы, полиэтиленовые трубы

FEATURES OF TECHNOLOGY AND MODERN TRENDS IN THE FIELD OF BUTT WELDING OF POLYETHYLENE PIPES (Review)

M.V. Yurzhenko

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

Pipelines for the transportation of natural gas, cold water supply and drainage are one of the most significant elements of urban and rural infrastructure. Pipelines from polymeric materials, in particular polyethylene, are a modern alternative to steel pipelines, which during 15-20 years of operation are destroyed under the influence of chemical and electrochemical corrosion. In the world and in Ukraine, almost all new split pipelines for gas supply, cold water supply and drainage are built from polyethylene pipes. In Ukraine, especially in large cities, a practice of replacing old worn steel pipelines with new polyethylene and renovating using the method of tightening a polyethylene pipe into the steel pipeline has become widespread. One of the most technological methods of butt joining of polyethylene pipes of almost the whole range of outer diameters is welding with a heated tool. Equipment for this welding method is currently not manufactured in Ukraine. The imported installations for butt welding of polyethylene pipes operate according to a conventional technological scheme, developed a long time ago, some elements of which, due to the improvement of the polymeric materials itself, can be revised and simplified preserving the high quality of final welded joints. The aim of the work is to review the state of the art in the field of butt welding of plastic products, first of all, polyethylene pipes with the heated tool and its modifications, which are the most interesting from the technological point of view. 28 Ref., 5 Fig.

Keywords: butt welding with a heated tool, plastics, polyethylene pipes.

Поступила в редакцию 17.04.2019

Подписано к печати 04.04.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 8,75. Усл.-отт. 9,04. Уч.-изд. л. 8,64.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

3D ПЕЧАТЬ В СУДОСТРОЕНИИ

Морская индустрия в целом не спешит принимать концепцию 3D печати. Использование непрерывного осаждения жидких металлов при программном управлении компьютера создало возможности для производства изделий сложных форм, таких как, например, поковки и отливки, избегая при этом необходимости в дорогой оснастке и временных задержек на изготовление пресс-форм. Несмотря на медленное начало, работы по разработке 3D технологий в Техническом университете Делфта в 2017 г. привели к производству первого в мире гребного винта путем осаждения металла. Большинство опубликованных материалов по 3D печати были недостаточно подробны, особенно в области медицины. Хотя и они иллюстрируют производство небольших сложных форм как процесс медленный и дорогой. Меньше публикаций, описывающих производство, в которых крупные технические изделия с использованием металлов производятся быстрее и с меньшими затратами, чем при использовании традиционных методов, таких как литье иковка.

Концепция 3D печати. Несколько методов для трехмерной печати с использованием металлов в настоящее время регулярно применяются специализированными организациями. По сути, они включают использование целевого источника тепла для плавления или спекания металлических сплавов при постепенном построении сложной трехмерной формы. Комплектуется компьютерная система с ЧПУ обычно многоосным роботом и направляющим источником тепла. Твердый металл в виде проволоки или порошка подается и плавится от источника тепла.

Один вариант использует лазер или электронный луч в качестве источника тепла в сочетании с металлическим порошком. Спекание происходит с помощью прямого лазера — Direct Metal Laser Sintering (DMLS) или электронного луча — Direct Metal Electron Beam Sintering (DMEBS). Эта порошковая техника наиболее эффективно применяется там, где требуется изготовить небольшие, delicate предметы. Примером является производство имплантатов тела [1–3].

При сварочной версии 3D печати «проволока-дуга» — Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) выполняется укладкой жидких капель из металла (рис. 1). Эта техника больше подходит для производства более крупных и тяжелых инженерных компонентов, о чем свидетельствует производство морских изделий и конструкции планера [4–6].

По сравнению с применением процессов WAAM и DMLS/DMEBS, сварочная версия наиболее подходит для производства более тяжелых и крупных продуктов, в то время как порошковая альтернатива лучше всего применяется там, где необходимо получение более мелких со сложной формой изделий. Другими словами, сварка — это, по сути, метод объемного наращивания, а использование порошка — это точный и строго контролируемый процесс.

Примеры производства WAAM. Несколько достижений в области 3D производства были получены и уместно проиллюстрировать их дости-

жения применительно к морской промышленности (рис. 1–4).

Движущие силы по развитию WAAM. Основной движущей силой развития является потенциал в части значительной экономии материалов. Одна конкретная область применения — производство планеров. Многие компоненты в настоящее время выполняются путем механической обработки из цельной заготовки послековки, при этом более 50 % исходного материала теряется в виде стружки. Другая рассматриваемая область — производство шасси, где ожидаемая экономия материала составляет 70 % при использовании аддитивного производства.

Текущая активность. Аддитивное изготовление изделий определяет несколько преимуществ, таких как значительное сокращение потерь материала, особенно при производстве многих разнородных деталей, и способность быстро создавать большое разнообразие изделий для опытных работ.

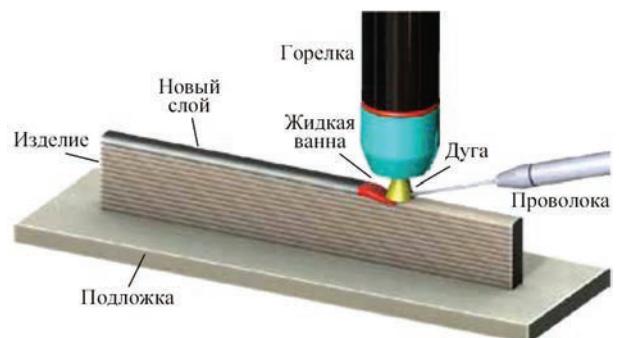


Рис. 1. Иллюстрация процесса WAAM



Рис. 2. Винт 200×240×240 мм (материал: 1.5125 G3Si1)



Рис. 3. Корпус колокола 230×380×380 мм (материал — алюминевый сплав)

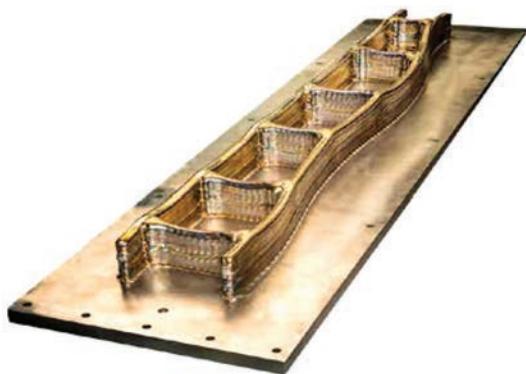


Рис. 4. Основной конструктивный элемент крыла самолета

Существует также ключевое преимущество, заключающееся в том, что процесс позволяет рассматривать возможности получения нетрадиционных конструкций, которые в противном случае невозможно практически изготовить из-за производственных или стоимостных ограничений, например, из-за сложных или необычных геометрий, сопровождающихся необходимостью решения ряда проблем.

Ранняя работа в Rolls-Royce в Университете Крэнфилд была направлена на применение 3D печати в производстве авиационных двигателей. Исследователями был разработан процесс осаждения «проволока + дуга» для изучения возможности использования в качестве конструкционных материалов инконеля, титана, алюминия и различ-

ных никелевых сплавов. С тех пор акцент сместился на изготовление планеров. Хотя «лазер + порошок» полезны для определенных применений, таких как быстрое прототипирование или для получения очень небольших и сложных деталей, эта технология ограничена из-за своей низкой скорости и ограниченных размеров компонентов, которые можно точно изготовить. Напротив, процессы, разрабатываемые в Крэнфилд, рассчитаны на высокие скорости осаждения. Центр Крэнфилда в настоящее время нацелен на уровень осаждения 10 кг/ч, по сравнению с обычными 0,1 кг/ч, используя «лазер + порошок», при котором может потенциально быть риск того, что материал не будет полностью уплотнен, если не произошло спекание между частицами порошка.

Аддитивные дуговые и проволочные системы также позволяют изготавливать детали размером несколько метров и упрощают процесс производства цельных линейных изделий.

Группа Damen Shipyards вошла в совместный консорциум с RAMLAB, Promarin, Autodesk, Бюро Веритас и разработала первый класс утвержденных гребных винтов. Ранняя работа по производству первого в мире винта WAAM в 2017 г. была прекращена [8]. Она была основана на дизайне Promarin, обычно встречающийся на буксире Damen Stan типа 1606 (рис. 5).

Стоимость оборудования. Технология порошкового осаждения требует организации системы, включающей лазерный или электронно-лучевой источник тепла, компьютерное оборудование для числового управления и устройство дозирования порошка. Типичная стоимость производственной системы составляет 750000 дол. Система с осаждением проволоки со стандартным оборудованием для дуговой сварки в сочетании с шарнирным роботом с 5 осями, обходится в 120000 дол. [9]

Стоимость расходных материалов. В настоящее время доступно только ограниченное количество металлических сплавов для аддитивного производства с использованием порошков, в основном это сплав Ti-6Al-4V, некоторые нержавеющие стали, Inconel 625/718 и Al-Si-10Mg. Стоимость порошков многих нержавеющих сталей находится в районе 400 долл./кг. Гораздо меньше проблем, когда дело доходит до процесса сварки плавлением. Существует широкий спектр сварочных проволок, большинство из которых можно использовать для осаждения дугой. Из-за большого количества производимых проволок ее стоимость не столь высока. Как правило, присадочная проволока из нержавеющей стали легко доступна по цене 30 долл./кг.



Рис. 5. Бронзовый винт 1300 мм, 180 кг

Сравнение производства «проволока + дуга» (WAAM) и «луч + порошок» (DMLS/DMEBS)

Присадочные металлы	WAAM	DMLS/DMEBS
	Широкий выбор. Все стандартные присадочные проволоки легко доступны	Ограничен выбор. Порошки, как правило, должны быть специально изготовлены
Стоимость присадочных материалов	Низкая	Высокая
Стоимость оборудования	Низкая. Стандартное оборудование для дуговой сварки с газовой защитой	Высокая. Специальное высокоточное оборудование
Скорость осаждения	Высокая, 10 кг/ч	Низкая, 0,1 кг/ч
Применение	Большие и тяжелые детали массой свыше 5 кг и размером более 460 мм	Мелкие и легкие детали с высокой точностью: протезы и компоненты аэрокосмической техники
Прочность	Как правило на уровне исходного материала	Доступная информация ограничена, но в общем хорошая
Преимущества/недостатки	Низкая стоимость После нанесения часто необходима механическая обработка	Высокая стоимость. Точное нанесение позволяет получать почти готовые детали

Скорость осаждения. Скорость осаждения порошка очень низкая и составляет в среднем 0,1 кг/ч. С развитием технологий она может существенно увеличиваться, но в настоящее время это сильно ограничивает применение. В процессе «проволока + дуга» производительность составляет 10 кг/ч для широкого спектра металлических сплавов (таблица).

Ограничения процесса. Многие сплавы могут быть использованы во время процесса WAAM при использовании в качестве защиты инертного газа сварочной горелки. Однако некоторые материалы гораздо более склонны к взаимодействию с остаточным кислородом, и это может привести к поверхностному окислению. Титановые сплавы особенно чувствительны, но нержавеющая сталь и многие низколегированные стали также требуют дополнительной защиты инертным газом.

При электронно-лучевом процессе обеспечивается защита, поскольку операции выполняются в вакууме. Тем не менее, это дорогая альтернатива дуговой сварке.

Преодоление проблемы загрязнения кислородом. Проблема адекватной защиты была решена путем разработки гибких корпусов, которые могут продуваться инертным газом, обычно аргоном. Они могут вместить все сварочное оборудование и робот и обеспечить защиту инертного газа в течение всего процесса осаждения.

Гибкая технология корпусов. С момента появления концепции были достигнуты значительные успехи в разработке корпусов еще более двух десятилетий назад. Например, Huntingdon Fusion Techniques Ltd [10] возглавил кампанию по разработке системы специально для сварочной промышленности. Эти инновационные продукты предлагают значительную привлекательность как альтернативу вакууму и «перчаточному ящику», не в последнюю очередь значительно снижающую стоимость.



Рис. 6. Небольшая гибкая система. Интерфейс робот/корпус эффективно защищен от утечек, используя адаптируемое замыкание. Шкафы объемом до 27 м³ были изготовлены для размещения больших систем

Самый большой объект на сегодняшний день составляет 27 м³, достаточный для размещения всех заготовок, сварочного оборудования и даже программируемой роботизированной системы. Корпус продувается инертным газом, содержание кислорода достаточно низкое, чтобы предотвратить окисление во время сварки и охлаждения.

Мониторинг содержания кислорода. Контроль и мониторинг в реальном времени содержания кислорода в продувочном газе имеет решающее значение. Методы измерения содержания кислорода были доступны в течение десятилетий, но только недавно были разработаны специальные инструменты для сварки. Пользователи все чаще требуют полного отсутствия изменения цвета осаждаемого металла и потери коррозионной стойкости, что подразумевает продувку систем. Содержание кислорода в газе должно составлять всего 20 частей на миллион (0,002 %). Очень немногие мониторы продувки кислородом способны соответствовать этой чувствительности, но инструменты PurgEye (рис. 7) удовлетворяют всем требованиям.



Рис. 7. Небольшая гибкая система. Усовершенствованный монитор кислорода включает цветной сенсорный экран-контроль. Прибор поддерживает регистрацию данных и сертификацию сварных швов. Показания точны до 10 промилле

Заключение. Основным преимуществом 3D печати является то, что она открывает возможности для производства изделий со сложным дизайном, в противном случае это не может быть практичным или экономичным решением. С точки зрения применений для WAAM и DMLS/DMEBS сварочная версия наиболее подходит для более тяжелых и крупных продуктов, в то время как по-

рошковая альтернатива лучше всего применяется там, где изделия небольшие и сложные по форме.

Многие сплавы должны быть защищены от загрязнения во время операции сварки. Формирование оксидов металлов может снизить коррозионную стойкость и повлиять на механические свойства. Использование эффективной бескислородной среды инертного газа имеет важное значение.

Список литературы

1. Cancer patient receives first 3D printed sternum and rib cage. Orthopaedics and Spine, July 2017.
2. Direct metal laser sintering, Bertol et al, Materials & Design, 2010.
3. Laser-Based Additive Manufacturing Processes. Woodhead Publishing, 2018.
4. World's first class approved 3D printed propeller. International Institute of Marine Surveying, May 2017.
5. Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture. Mehnen et al. 20th CIRP Design Conference, Nantes April 2010.
6. Wire & Arc Additive Manufacturing. Williams et al, Materials Science & Technology 2016 Vol 32.
7. Williams S. WAAM Current and Future Developments. Additive Manufacturing for Aerospace, Defence and Space conference. London, March 2016.
8. Damen shipyards release further details about world's first 3D printed propeller. 3D Printing Industry. September 2017.
9. Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison. Martina F.
10. Huntingdon Fusion Techniques Ltd, UK.

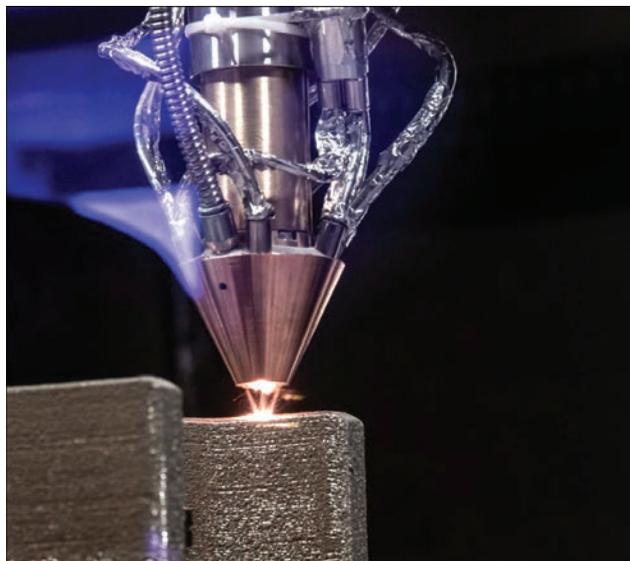
М. Флетчер (по материалам «White Paper»)

НОВЫЙ ПРОЕКТ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С апреля 2017 г. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет является головным исполнителем в России крупного комплексного проекта в сфере аддитивных технологий — «Создание производства точных крупногабаритных заготовок из высокопрочных и жаростойких сплавов на основе гибридных ми-

крометаллургических процессов формообразования для перспективных двигателей авиационно-космической, наземной и морской техники».

Для создания высокотехнологичного производства в СПбГМТУ разрабатывается технологический процесс прямого лазерного выращивания точных титановых заготовок с размером до 2,1 м.





Также проектом предусмотрены: разработка, изготовление и ввод в эксплуатацию на площадке предприятия–партнера технологической установки прямого лазерного выращивания.

В настоящее время в Институте лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ изготовлена и испытывается уникальная, не имеющая аналогов роботизированная установка прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок. Двухкоординатный рабочий стол грузоподъемностью 1,5 тыс. кг позволяет обрабатывать изделия диаметром более 2 м.

Технологический инструмент перемещается с помощью шестиосевого промышленного робота-манипулятора. Для увеличения досягаемости робот установлен на дополнительную линейную ось. Таким образом, кинематическая схема установки имеет девять синхронно управляемых осей, что обеспечивает возможность выращивания изделий сложной пространственной конфигурации.

Герметичная камера позволяет создать контролируемую рабочую атмосферу с содержанием кислорода менее 100 ppm. Система подачи порошка имеет 2 колбы объемом по 5 л и обеспечивает расход порошка до 5 кг/ч. При этом встроенный функционал позволяет контролировать количество порошка в колбе, информировать оператора о необходимости загрузки порошка, а также переключать подачу порошка с колбы на колбу в автоматическом режиме по заданному алгоритму. На данный момент это самая крупногабаритная машина в линейке аддитивных установок, разработанных в СПбГМТУ.

После проведения предварительных испытаний установка будет передана предприятию-заказчику. Пуско-наладочные работы на территории заказчика запланированы на май 2019 г. В настоящее время организовано обучение специалистов заказчика.

Иллюстративным фрагментом результатов этого проекта является получение заготовки внеш-

него кольца авиационного двигателя, изготавливаемого из отечественного титанового сплава. Максимальный диаметр заготовки превышает 2 м, масса достигает 80 кг.

В ходе предварительных испытаний технологического процесса прямого лазерного выращивания был изготовлен первый опытный образец данной детали. Это, без преувеличения, уникальный опыт (не только российский, но и мировой).

Изготовлению этого образца предшествовали полномасштабные всесторонние теоретические и экспериментальные исследования: были разработаны математические модели процесса, проведено большое количество металлографических исследований, томографии и рентгенографии образцов, механических испытаний, определены оптимальные режимы и стратегии выращивания, изготовлено несколько макетов.

Разработка технологии шла совместно с разработкой технологической установки. Таким образом, технологические особенности учитывались при проектировании оборудования, а технические характеристики оборудования учитывались при разработке технологии.

В ходе выращивания опытного образца было применено несколько новых технических решений, которые в настоящее время находятся в стадии правовой защиты. Например, выращивание горизонтальным лазерным лучом, использование «динамической» подложки для борьбы с образованием трещин, технологические приемы увеличения производительности процесса, прогнозирование термических деформаций и их учет в технологической модели изделия при генерации управляющей программы для обеспечения требуемой точности построения.

Внедрение технологии прямого лазерного выращивания позволяет значительно снизить производственную себестоимость изготовления деталей такого класса за счет снижения временных затрат (выращивание заняло чуть больше 130 ч), повышения коэффициента использования материала, снижения затрат на последующую механическую обработку.

При этом механические свойства выращенного материала не уступают металлу проката и значительно превосходят свойства литья, что подтверждено результатами механических испытаний, проводимых как в лабораториях университета, так и в лабораториях организаций-партнеров, а также в независимых лабораториях, включая Центральную заводскую лабораторию.

Реализация проекта рассчитана на срок до декабря 2019 г.

А. Бутенин, пресс-секретарь СПбГМТУ

КИЕВСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА – 2019

2–5 апреля в Киеве на территории Международного выставочного центра состоялась XI Международная специализированная выставка «Киевская Техническая Ярмарка – 2019». Организатором выставки является ООО «Международный выставочный центр». Главная цель выставки — это демонстрация лучших достижений науки, техники и технологий, необходимых для инновационного развития экономики Украины, а также содействие в установлении деловых, экономических и торговых связей между отечественными предприятиями и странами ближнего и дальнего зарубежья. Специализированная выставка позволяет предприятиям ознакомиться с мировыми новинками в своей области и продемонстрировать собственные разработки, выверить конкурентоспособность своей продукции. Киевская техническая ярмарка — это логическое продолжение Международного промышленного форума, крупнейшей отраслевой выставки Украины, которую Международный выставочный центр более 17 лет подряд проводит в последнюю неделю ноября.

Тематика выставки включала демонстрацию достижений в области машиностроения, металлургии, сварки, резки, 3D технологий, металлообработки, диагностики и автоматизации управления, обработки поверхности, производства инструментов, двигателей, литейного оборудования, насосного оборудования, неметаллических материалов в промышленности, которые представили фирмы из 12 стран.

Посетитель получил возможность ознакомиться с широким спектром продукции разнообразных предприятий в условиях здоровой и честной конкуренции; возможность получить консультацию непосредственно от производителя и задать все интересующие вопросы.

Каждый день был ярким и насыщенным. Помимо новейших технологических разработок посетителям также запомнились образовательные семинары и конференции, которые проходили на открытых конференц-площадках и в конференц-залах. Специалисты ведущих компаний отрасли поделились своим опытом с коллегами, рассказали об особенностях и перспективах развития Украины на мировом рынке.

Выставка дала возможность компаниям-производителям и заказчикам встретиться в конкурентных условиях и принять решение, исходя из частных критериев, увидеть оборудование воочию, протестировать его рабочие мощности, лично пообщаться с первыми лицами компании.

Большой интерес у посетителей и участников вызвал семинар по 3D печати, проведенный 4 апреля на открытом дискуссионном пространстве выставки. Были представлены следующие доклады:

– «3D печать металлическими сплавами. Технология послойного лазерного плавления как основной инструмент современного машиностроения», ООО «Аддитивные Лазерные Технологии Украины», Днепр. Компания предлагает технологии и оборудование для получения изделий из металлических сплавов методом 3D печати; комплексные инновационные решения для лазерного аддитивного производства; производство 3D принтеров на основе технологии прямого лазерного спекания (DMLS); разработку и изготовление промышленных прототипов и частей газотурбинных двигателей, в том числе изготовление металлических изделий сложной геометрии.





– «Simufact Additiv — 3D моделирование процессов печати металлами», Инженерная компания «Технополис», Киев. Является системным интегратором и авторизованным партнером ведущих разработчиков инженерного программного обеспечения.

– «3D печать для промышленных предприятий», ООО «Иматек Эско», Киев. Компания является эксклюзивным представителем компании 3D Systems Inc. (США) в Украине. С 2005 г. занимается внедрением решений на основе 3D принтеров, 3D сканеров и услуг 3D печати. Работает с предприятиями и компаниями в области автомобилестроения, архитектуры, медицины. Занимается продажей широкоформатных принтеров и сканеров компаний ROWE (Германия), Contex (Дания) и программных решений для автоматизации документооборота на предприятиях.

Традиционно в ярмарке приняли участие ООО «Арамис», ООО «Витаполис», ООО «Триада Сварка», ООО «Фрониус Украина», предлагающие оборудование для сварки и резки, сварочные материалы и услуги по интеграции промышленных роботизированных сварочных комплексов.

На стенде издательства ИЭС им. Е.О. Патона были представлены журналы, книги, тематические сборники и сборники трудов конференций, опубликованные в 2018–2019 гг. Как всегда большой интерес у посетителей вызвал журнал «Автоматическая сварка» — ведущий журнал Украины в области сварки, резки, наплавки, напыления и 3D технологий.

А.Т. Зельниченко

– «Применение 3D печати в медицине», ООО «Вива Арт», Киев. Компания специализируется в продаже профессиональных принтеров для 3D печати и всех необходимых материалов для создания собственного производства 3D моделей. Оказывает услуги по 3D печати: печать из пластика, цветная печать гипсом, кобальт-хромом. Сканирование как мелких объектов, так и скан в рост человека.

– «Промышленные технологии 3D печати — полимеры, металл, керамика». Компания «Смарт-принт», Киев. Является ведущей компанией в Украине по технологии 3D печати, является аккредитованным поставщиком ГК «Укроборонпром». Компания выполняет индивидуальные и серийные заказы по 3D печати.

Эффективная сварка благодаря сварочной системе TransSteel 2200 компании Fronius*

Для сварки стали нужен прочный и надежный аппарат, способный безупречно работать даже в сложных условиях, которые часто встречаются в строительстве, сельском хозяйстве и производстве металлоизделий. Инновационная система TransSteel 2200 — это первый на рынке однофазный инверторный источник питания для сварки MIG/MAG, который поддерживает несколько процессов и обеспечивает эффективную сварку стали. Мультисистема TransSteel 2200 обеспечивает наилучшее качество при сварке MIG/MAG, TIG, а также при сварке стержневым электродом. На сегодняшний день доступны и другие модели: TransSteel 2200/2700/3500C.

Универсальный источник TransSteel 2200 признан лучшим продуктом 2018 г. и победил сразу в двух номинациях. Во-первых, мультисистема получила премию Plus X Award как «Лучший продукт 2018», а во-вторых, этот компактный универсальный источник был отмечен наградой Red Dot Design Award.

TransSteel 2200 компании Fronius был избран Лучшим продуктом 2018 г. в категории профессионального оборудования. Plus X Award является выдающейся премией за инновации в области технологий, спорта и предметов быта, ее кредо — предоставлять потребителям надежный ориентир. Экспертное жюри, в которое входят представители различных отраслей, отбирает продукты по следующим критериям: инновационность, дизайн, высокое качество, легкость использования, функциональность, эргономичность и экологичность. Продукту, который наберет больше всего баллов по всем категориям в своей группе, присуждается специальная награда «Лучший продукт года».

Сварочный источник TransSteel 2200 подходит для широкого спектра сварочных процессов и применения в различных отраслях. Его основное предназначение — сварка стали в мастерских, сборочные и ремонтные работы, а также работы по техническому обслуживанию. Этот продукт определяется непревзойденными характеристиками сварки для всех процессов. Для изготовления его конструкции использовались материалы высокого качества, которые обеспечивают первоклассную работу. Кроме того, Fronius применяет прочные материалы, в частности, высокопрочный пластик, что гарантирует высокое качество и долговечность устройства. Аппарат массой всего 15,5 кг идеально подходит для портативного применения и отличается прочным корпусом.

Одно из главных преимуществ TransSteel 2200 — разнообразные сварочные характеристики, включая характеристики для сварки алюминия и медно-кремниевых сплавов. Также инверторный источник питания для сварки MIG/MAG оснащен вторым газовым магнитным клапаном, который позволяет легко переключаться с процесса MIG/MAG на процесс TIG. Сварщики оценят удобство дисплея и простоту навигации меню: панель управления TransSteel 2200 удобная и интуитивно понятная. TransSteel 2200 также

* Статья на правах рекламы.



Мультисистема TransSteel 2200 обеспечивает наилучшее качество при сварке MIG/MAG, TIG, а также при сварке стержневым электродом



Технология компенсации коэффициента мощности (PFC) позволяет использовать более длинные сетевые кабели, увеличивая радиус действия устройства



характеризуется высокой эргономичностью. Для максимально простой транспортировки и передвижения сварочная система оборудована ручкой, дополнительным ремнем для переноски и накладками на боковых поверхностях. Идеальные сварные швы можно выполнять тремя простыми действиями. В этом источнике питания есть функция, которая на основании выбранного параметра сетевого плавкого предохранителя позволяет выполнять сварочные операции максимально долго. Это достигается за счет плавной автоматической регулировки сварочного тока. При этом устройство обеспечивает неизменно высокое качество сварки. Система Fronius также имеет опре-

Компания Fronius разработала серии TransSteel 2200/2700/3500C для портативного использования. В исследовательской лаборатории компании мультисистемы прошли все необходимые испытания на нагрузку и оказались значительно надежнее, чем предусматривают необходимые стандарты

деленные преимущества по показателям экологичности. Функция автоматической компенсации коэффициента мощности (PFC) сглаживает пики потребления электроэнергии, позволяет более эффективно использовать имеющуюся мощность, а также использовать более длинные сетевые кабели, обеспечивая увеличенный радиус действия устройства и большую гибкость работы сварщика. Конструкция TransSteel 2200 состоит из меньшего количества компонентов, чем в предыдущих моделях. Благодаря этому устройство стало легче, и, в частности, изготовлено с экономией природных ресурсов.

В дополнение к премии Plus X за лучший продукт система TransSteel 2200 получила награду Red Dot Award за дизайн устройства. По утверждению жюри, сварочная система отличается особой многофункциональностью и чрезвычайно компактными габаритами. Судьи также одобрили легкость использования TransSteel 2200. В 2018 году квалифицированное жюри Red Dot Award выбрало лучшие дизайны. Отбор длился несколько дней. В нем приняли участие 6300 продуктов производителей из 59 стран.

Fronius International — австрийское предприятие с главным офисом в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Заттледте. Предприятие специализируется на системах для зарядки батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 4550 сотрудников. Доля экспорта составляет 91 %, что достигается благодаря 30 дочерним компаниям, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 1242 действующим патентам, Fronius является лидером в этой области технологий на мировом рынке.



ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»
07455, Киевская обл., Броварской р-н,
с. Княжичи, ул. Славы, 24
Тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44
E-mail: sales.ukraine@fronius.com
www.fronius.ua

Пути развития современного промышленного предприятия

На одной из крупнейших в мире выставке промышленных технологий Hannover Messe в этом году было объявлено о совмещении мероприятий, касающихся развития IT и промышленности. Отныне эти две отрасли стали нераздельными в концепции Industry 4.0. — сегодня современный завод уже выглядит как цифровая экосистема. Нет больше разделения на автоматизацию оборудования и автоматизацию бизнес-процессов. Новые технологии машинного обучения, анализа и прогнозирования, интернет вещей IoT (Internet of Things) и промышленный интернет вещей IIoT (Industrial Internet of Things) позволяют создать единое киберфизическое цифровое пространство.

Говоря о желании синхронизировать Украину с мировыми тенденциями, стоит отметить, что впервые за 10 лет на этой выставке в павильонах Hi-Tech были представлены и украинские стенды, где можно было увидеть готовые решения для цифровых экосистем. Было бы правильнее, если бы в следующем году Украина профинансировала общий стенд для украинских компаний, что позволило бы показать уровень цифровой интеграции бизнес-процессов в стране. Такая практика у нас существует на уровне создания и поддержки некоторых институций: Украинский культурный фонд призван поддержать развитие национальной культуры и искусства в стране, Украинский институт, Институт книги, являются долговременными и достаточно затратными проектами, рассчитанными на длительное укоренение. Заметны общие стенды на крупнейших книжных ярмарках во Франкфурте и Вене, есть национальный павильон на Венецианской биеннале. В целом виден стратегический прицел и развитие на перспективу.

Направления «традиции и культура» и «IT и промышленность» равноправны по значимости и можно представить, какой глубокий и весомый результат мы получим, если развивать их одновременно — духовное развитие в масштабах нации и новая технологическая реальность. Мировая практика показывает, какое огромное значение придают развитию технологичности в мире: Китай вкладывает колоссальные средства, финансируя бесчисленные программы по привлечению зарубежных экспертов и ученых, при этом Китай работает на себя, в закрытом режиме. Евросоюз (а это 28 стран), создал общую площадку для взаимодействия, этим повышает глобальную конкурентоспособность и делает европейскую экономику динамичной. Одна только программа Горизонт 2020 имеет бюджет около 80 млрд евро.

В Украине нет условий для поддержания инноваций: мизерное финансирование науки, отсутствие механизма защиты интеллектуальной собственности, неразвита инфраструктура для исследований и внедрения инноваций. За всю историю независимой Украины на развитие науки максимальные отчисления составили не более 0,4 % ВВП, при этом вклад промышленности мизерный. В стране олигархическая экономика, не предполагающая конкуренции в промышленности, поэтому сегодня 95 % всех предприятий находятся на 3-4 технологическом уровне, тогда как Европа уже перешла на 6-7 уровень.

Еще раз стоит сделать акцент на равноправии внутреннего и внешнего развития современного человека, иначе неизбежна стагнация в мышлении и отсутствие динамики. Промышленный сектор как часть единого целого Украины может и должен быть представлен в масштабах мировой цепочки производства продукта, касается ли это создания новых технологий в области сварки или же IT-решений в области предиктивного технического обслуживания оборудования.

Готовность Украины для взаимодействия и коммуникации



Новые проекты



Изделия, выращенные с использованием аддитивных технологий



Рабочие моменты «Триада-Сварка» и ЗНТУ

с миром просто необходима, значительный рост ВВП возможен только в случае цифровой трансформации и, если мы имеем серьезные амбиции развить цифровое технологичное производство, необходимо ускорить объединение IT и промышленности.

Компания «Триада-Сварка» как интегратор промышленных процессов в производство понимает это и стремится к максимальному единению со смежными отраслями. Предприятие занимает активную позицию в вопросах развития технологичности и вкладывает средства в свое развитие как участника промышленного сектора Украины.

Год назад «Триада-Сварка» приняла активное участие в работе научно-практической конференции «Сварка 2018: наука, образование, производство и бизнес», проведенной в рамках Промышленного форума в Запорожье, речь шла о единении представителей науки, производства, бизнеса и образования для эффективного взаимодействия друг с другом. Сегодня уже созданы обучающие программы для студентов технических вузов, колледжей, ВПУ, на базе техцентра «Триада-Сварка» проводятся семинары и лабораторные работы. Ведутся разработки и исследования в области сварки в развитии аддитивных технологий. Появился совместный проект «Триада-Сварка» с НУ «Запорожская Политехника» по созданию и внедрению новой обучающей технологии VR/AR (виртуальной и дополненной реальности). Проект может объединить кафедры электропривода, информационных технологий и сварки, где каждая будет изучать свой вопрос. В итоге можно будет, одев маску, погрузиться в виртуальную среду, где можно осуществлять процессы сварки с помощью робота. Над созданием программы работали студенты в течение года на базе лаборатории киберфизических систем бизнес-инкубатора университета. В рамках выставки Международный промышленный форум 2019 в Запорожье на стенде «Триада-Сварка» будут одновременно работать специалисты «Триада-Сварка» и студенты НУ «Запорожская Политехника», показывая реальный роботизированный комплекс и такой же виртуальный.

Сегодня технические вузы переживают глубокое стратегическое переосмысление самой системы подготовки студентов, зная, что производство будущего хочет получить специалистов, понимающих, как функционируют роботы, как ими управлять. Это серьезная работа. Смещается фокус в мышлении студентов, в их способности генерировать инновации, применяя навыки и знания в глобальном масштабе, когда важны кооперация с внешними партнерами, взаимодействие всех со всеми: технологий, машин и людей. Ведь другие модели в условиях 4.0 уже не работают.

Центр R&D, созданный на основе технической базы «Триада-Сварка», будет и в дальнейшем работать для исследования и развития новых технологий. Также будет развиваться общая программа обучения и взаимодействия предприятия «Триада-Сварка» и университета, такая совместная работа способствует повышению конкурентоспособности выпускников — будущих инженеров и научных разработок, и служит прекрасным примером тесного взаимодействия индустрии, образования и науки.

С начала года предприятие «Триада-Сварка» ведет несколько проектов по роботизации, в том числе и экспортные.

Миссия компании «Триада-Сварка»: «Мы делаем мир технологичней, создавая умные производства».

Красносельская Е.Г.



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