№ 9 (745) Сентябрь 2015

Издается с 1948 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.), В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.). Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко, А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,

И. В. Кривцун. Ю. Н. Ланкин. Л. М. Лобанов, В. Д. Позняков, И. А. Рябцев,

В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко Ученые университетов Украины М. Н. Брыков, ЗНТГУ, Запорожье,

В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков, В. Ф. Квасницкий, НУК, Николаев, В. Д Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев

Зарубежные ученые Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ Гуань Цяо

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай А. С. Зубченко

ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ М. Зиниград

Ун-т Иудеи и Самарии, Ариэль, Израиль В. И. Лысак

Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ У. Райсген

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия Я. Пилярчик

> Ин-т сварки, Гливице, Польша О. И. Стеклов

РНТСО, Москва, РФ Г. А. Туричин

С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы Т. В. Юштина, Н. А. Притула Электронная верстка И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

Адрес редакции ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11 Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277 Факс: (38044) 200 5484, 200 8277 E-mail: journal@paton.kiev.ua

Учредители

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

www.patonpublishinghouse.com

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001 ISSN 0005-111X

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

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

Интервью с заместителем директора ИЭС им Е.О. Патона

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кучук-Яценко С.И., Зяхор И.В., Чернобай С.В., Наконечный А.А., Завертанный М.С. Структура соединений алюминида титана v-TiAl при контактной стыковой сварке сопротив-Устинов А.И., Фальченко Ю.В., Мельниченко Т.В., Петрушинец Л.В., Ляпина К.В., Шишкин А.Е., Гуриенко В.П. Диффузионная сварка стали с оловянной бронзой через пористые прослойки никеля и меди 15 Ющенко К.А., Яровицын А.В., Хрущов Г.Д., Фомакин А.А., Олейник Ю.В. Анализ процесса формообразования валика Матвиенко В.Н., Мазур В.А., Лещинский Л.К. Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинирован-Рябцев И.А., Ланкин Ю.Н., Соловьев В.Г., Осечков П.П., Тищенко В.А., Тихомиров А.Г. Компьютерная информационно-измерительная система для исследования процессов

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Лобанов Л.М., Махлин Н.М., Смоляков В.К., Водолазский В.Е., Попов В.Е., Свириденко А.А. Оборудование для подготовки торцов труб применительно к сварке неповоротных стыков Григоренко Г.М., Пузрин А.Л., Атрошенко М.Г., Полещук М.А., Шевцов А.В., Моссоковская И.А. Автовакуумная пайка при ремонте медных панелей кристаллизаторов МНЛЗ 48 Шаповалов К.П., Белинский В.А., Косинов С.Н., Литвиненко С.Н., Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. Изготовление крупногабаритных станин электрошлаковой сваркой плавящимся мундштуком 53 Левченко О.Г., Кулешов В.А., Арламов А.Ю. Характеристики шума при сварке в аргоносодержащих защитных газах 57

ИНФОРМАЦИЯ

Идеальный сварной шов возможен. TPS/i Robotics ершина Интеллектуальной Революции 61 Источники питания для дуговой сварки и наплавки с улуч-

Avtomaticheskaya Automatic Welding

№ 9 (745) September 2015

Published since 1948

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief B. E. Paton

Scientists of PWI, Kyiv
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,
A. T. Zelnichenko, V. V. Knysh,
I. V. Krivtsun, Yu. N. Lankin,
L. M. Lobanov,

V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev, V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

Scientists of Ukrainian Universities
M. N. Brykov, ZNTSU, Zaporozhje
V. V. Dmitrik, NTU «KhPI», Kharkov
V. F. Kvasnitskii, NUS, Nikolaev
V. D. Kuznetsov, NTUU «KPI», Kyiv

Foreign Scientists

N. P. Alyoshin

N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia Guan Qiao

Beijing Aeronautical Institute, China

A. S. Zubchenko

OKB«Gidropress», Podolsk, Russia

M. Zinigrad

College of Judea & Samaria, Ariel, Israel
V. I. Lysak

Volgograd State Technical University, Russia

Ya. Pilarczyk

Welding Institute, Gliwice, Poland

U. Reisgen

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany
O. I. Steklov

Welding Society, Moscow, Russia

G. A. Turichin

St. Petersburg State Polytechn. Univ., Russia

Editors

T. V. Yushtina, N. A. Pritula Electron galley I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda

Address of Editorial Board: 11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77 Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77

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

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine, Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, IA «Welding» (Publisher)

> State Registration Certificate KV 4788 of 09.01.2001 ISSN 0005-111X

All rights reserved. This publication and each of the articles contained here in are protected by copyright.

Permission to reproduce material contained in this journal must be obtained in writing from the Publisher

Published monthly

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

INDUSTRIAL

INFORMATION

Интервью с заместителем директора ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины академиком Л.М. Лобановым

На протяжении всего периода деятельности Института электросварки им. Е.О. Патона большое внимание уделяется созданию высокоэффективных сварных конструкций. В настоящее время это направление работ возглавляет академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины Леонид Михайлович Лобанов. Его научная деятельность связана с фундаментальными и прикладными исследованиями в области материаловедения, прочности материалов и сварных конструкций. Его труды посвящены исследованиям поведения материалов при сварке, развитию теории сварочных напряжений и деформаций, разработке методов исследования и регулирования напряженно-деформированных состояний сварных соединений, созданию сварных конструкций новой техники, разработке методов и средств их неразрушающего контроля и диагностики.

Исследования и разработки, выполненные Л.М. Лобановым и возглавляемым им коллективом отмечены:

1981 г.— Премия Совета Министров СССР за разработку и внедрение новых физических методов исследования и усовершенствования металлургических процессов и конструкций новой техники;

1994 г. — Государственная премия Украины в области науки и техники за цикл научных работ в области теории расчетов пространственных конструкций и сооружений на статические и динамические нагрузки;

2004 г.— Премия им. Е.О. Патона за цикл работ в области прочности, диагностики и продления ресурса сварных конструкций.

Л.М. Лобанов опубликовал свыше 700 научных трудов, включая 80 авторских свидетельств и патентов. Он подготовил 9 докторов и 16 кандидатов технических наук. Награжден орденами «За заслуги» I, II и III степени, а также Орденом «Знак почета», отмечен наградой НАН Украины «За научные достижения».

В канун 75-летия со дня рождения Л.М. Лобанова редакция журнала взяла у юбиляра интервью, касающееся направлений его деятельности.



Леонид Михайлович, многие ученые и специалисты в Украине и за рубежом знакомы с Вашими публикациями по теме создания экономичных сварных конструкций, контроле их качества и повышения надежности. Каковы истоки появления у Вас интереса к этому направлению?

Создание экономичных, надежных и долговечных сварных конструкций, работающих на земле и под водой, при нормальных, высоких и низких температурах, в различных экстремальных условиях эксплуатации является важной научно-технической проблемой. Большой вклад в ее решение внесли ученые и специалисты Института электросварки им.

Е.О. Патона НАН Украины. Обладая большими знаниями и неординарной инженерной интуицией, основатель нашего института Евгений Оскарович Патон определил основные направления работ, связанных с созданием надежных и экономичных сварных конструкций. Они предусматривают комплексное решение исследовательских, материаловедческих, конструкторских и технологических задач. Такой подход получил широкое развитие благодаря деятельности его учеников и последователей. Исследования и разработки, проведенные в ИЭС, дали возможность изготовлять рациональные сварные конструкции при высоком уровне автоматизации и механизации сварочных работ. При этом основные объемы сварочных работ переносятся в заводские условия, что обеспечивает значительный рост производительности сварочных процессов и повышение качества сварных соединений.

9/2015



Какие актуальные задачи в отмеченной области необходимо решать сегодня?

В настоящее время выполняется комплекс новых исследований по оценке статической и циклической прочности сварных соединений с учетом их механической неоднородности и наличия трещиноподобных дефектов, сопротивления сварных соединений хрупким и слоистым разрушениям, по разработке научных подходов к обеспечению надежности и долговечности сварных конструкций при выполнении требований по снижению их металлоемкости, создании технологий упрочняющих обработок сварных соединений, применении математических методов исследования термодеформационных процессов при сварке, широком применении средств неразрушающего контроля и технической диагностики сварных соединений и конструкций. Создаются новые типы высокоэффективных сварных конструкций, в том числе строительные металлоконструкции, пролетные строения мостов, тяжелонагруженные конструкции из высокопрочных сталей для горнодобывающей техники и железнодорожного транспорта.

Какие практические примеры воплощения в жизнь в последние годы разработок ИЭС в области сварных конструкций?

Следует отметить сооружение в Киеве Национального спортивного комплекса «Олимпийский» перед проведением европейского футбольного чемпионата EBPO-2012. Коллективом ИЭС были разработаны и внедрены технологии сварки несущих металлоконструкций этого уникального комплекса.



Проведено научно-технологическое сопровождение сборочно-сварочных работ в заводских условиях, а также непосредственно на строительной площадке. Аналогичные работы были выполнены при сооружении Международного выставочного центра на Броварском шоссе в г. Киеве.

Внедрены новые стали С390-С690 в производство сварных конструкций и с их применением создан ряд уникальных инженерных сооружений, среди которых резервуары для хранения нефти вместимостью 50 и 75 тыс. т, пролетные строения Подольского мостового перехода и Чабанского моста в г. Киеве. Сотрудники ИЭС приняли активное участие в строительстве Дарницкого железнодорожно-автомобильного моста в г. Киеве и участвуют в строительстве Запорожского мостового перехода. Выполнено научно-техническое сопровождение сборочно-сварочных работ при монтаже металлоконструкций крыши из алюминиевого сплава терминала «Д» в аэропорту Борисполь. Большой опыт исследований и разработок ИЭС в области проектирования и изготовления различных типов строительных конструкций, определения их технического состояния и реконструкции обобщен в трехтомном издании «Сварные строительные конструкции».

Леонид Михайлович, в Ваших публикациях часто употребляется понятие «бездеформационная сварка конструкций». Не могли бы Вы пояснить в чем заключается такой подход при производстве конструкций?

Благодаря нашим разработкам сформировано новое научно-техническое направление — бездеформационная сварка конструкций, которое базируется на создании предварительных перед сваркой напряженно-деформированных состояний, оптимизированных по отношению к свароч-

4 — 9/2015

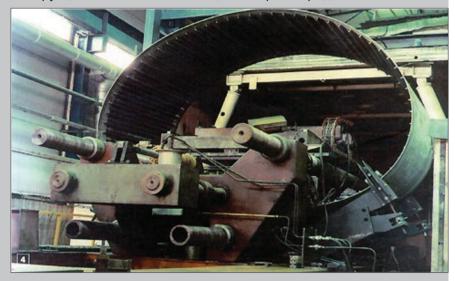


ным напряжениям и деформациям. Для всех типов сварных соединений разработаны способы определения оптимальных параметров предварительных напряженно-деформированных состояний, которые позволяют устранить остаточные сварочные деформации. Такой подход включает также применение сборочно-сварочных агрегатов, которые объединяют деформирующие системы, оборудование для механической обработки свариваемых кромок в условиях заданного нагружения и специализированную сварочную аппаратуру.

Назовите, пожалуйста, примеры его использования.

Он реализован на предприятиях ракетно-космической и авиационной промышленности при изготовлении тонколистовых конструкций из легких сплавов, к которым предъявляются высо-

кие требования точности геометрических размеров и качества соединений. Уникальные vстановки были поставлены по контрактам Китайской предприятиям народной республики. В настоящее время заключен договор с КБ «Южное» на разработку технологии бездеформационной сварки стрингерных панелей, а в дальнейшем и стрингерных оболочек из высокопрочного алюминиевого сплава.



Каким новым методам неразрушающего контроля Вы бы отдали предпочтение?

Сделан значительный вклад в создание систем диагностики изделий космической и авиационной техники. Разработан диагностический метод электронной ширографии, который основан на применении лазерной аппаратуры и компьютерной обработки оптической информации. Его существенным преимуществом являются бесконтактность измерений и возможность осуществлять в реальном масштабе времени неразрушающий контроль качества объектов как из металлических, так и композиционных материалов. Разработанная технология диагностики и ширографическая аппаратура внедрены в КБ «Южное». Исследования, проведенные по заказу ГП «АНТОНОВ» на образцах обшивки самолета, показали, что методом электронной ширографии выявляются коррозионные повреждения элементов фюзеляжа и крыла самолета без демонтажа облицовки и герметика.

На основе применения способа электронной спекл-интерферометрии созданы технология и портативный прибор для определения остаточных напряжений в сварных соединениях конструкций новой техники. Конкурс, проведенный Международным институтом сварки, подтвердил, что разработанный в ИЭС метод и аппаратура для его реализации обеспечивают достоверную оценку локальных особенностей остаточного напряженного состояния сварных соединений. Эта методология и оборудование эффективно используются в лабораторной практике ИЭС и поставлены по контрактам различным промышленным и исследовательским организациям дальнего зарубежья.

Леонид Михайлович, известно, что в последние десятилетия Вы много сил и энергии отдаете проблеме остаточного ресурса длительно работающих конструкций и сооружений. Каким образом организована работа в этом направлении в Украине?

Во многих странах прослеживается тенденция исчерпания нормативных сроков эксплуатации большого количества конструкций, сооружений, инженерных систем. Особое значение эта проблема приобрела в Украине. Вследствие сложных экономических условий большинство субъектов хозяйственной деятельности практически прекратили обновление основных фондов. В этой



связи вопросы безопасности функционирования ответственных объектов промышленности, энергетики, транспорта, строительства становятся с каждым годом все более актуальными. Важными являются задачи, связанные с управлением эксплуатационной надежностью и долговечностью таких объектов путем определения их технического состояния и остаточного ресурса, установления научно обоснованных сроков и регламентов эксплуатации.

Решению этих задач посвящена целевая комплексная программа НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин», которая выполняется с 2004 г. Научным руководителем программы является академик Борис Евгеньевич Патон. Цель программы — разработка методологических основ прогнозирования остаточного ресурса, создание методов, технических средств и технологий для оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации техногенно и экологически опасных объектов.

Проекты программы направлены на выполнение таких важных заданий, как развитие методов и средств неразрушающего контроля качества и технической диагностики конструкций; создание систем непрерывного мониторинга ответственных объектов длительной эксплуатации с использованием современных информационных технологий; разработка способов прогнозирования остаточного ресурса конструкций с повреждениями и технологий восстановления их работоспособности; создание эффективных методов, механических средств и технологий для оценки и продления ресурса оборудования тепловой и атомной энергетики, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, нефте- и газопроводов, авиакосмической техники, а также мостов, строительных и транспортных конструкций; подготовка нормативных документов, научно-технических справочников и пособий по вопросам оценки и продления ресурса объектов длительной эксплуатации.

Есть ли положительные результаты выполнения работ по программе «Ресурс»?

В процессе выполнения проектов программы получены значительные научно-технические и практические результаты. Так, внедрены акустико-эмиссионные системы для непрерывной диагоностики компонентов оборудования на Одесском припортовом заводе и теплоцентрали «Киевэнерго», создана аппаратура для бесконтактного измерения износа поверхностей железнодорожных рельсов, разработана методология низкочастотного ультразвукового контроля повреждений в труднодоступных участках трубопроводов, разработаны технология и оборудование для формирования усиливающих конструкций с применением металлополимерной проволочной муфты для ремонта локальных дефектов нефте- и газопроводов без остановки транспорта продуктов, восстановлены уникальные промышленные изделия и пролетные строения железнодорожных мостов, созданы современные стандарты и нормативные документы для инженерной практики и многое другое.

Основные результаты работ по каждому проекту программы обобщаются в итоговых сборниках статей, которые издаются институтом каждые три года. Специалисты считают эти сборники энциклопедией по вопросам ресурса. Они являются важным вкладом в формирование научно-технического аспекта инженерной культуры в нашей стране и предоставляют новый инструментарий в решении проблем ресурса безопасной эксплуатации конструкций и оборудования.

Благодарим Вас, Леонид Михайлович, за интересное и обстоятельное освещение проблем, связанных с созданием современных сварных конструкций и желаем Вам крепкого здоровья и новых достижений на благо Украины.

Редакция журнала

9/2015



УДК 621.791.762.1

СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИДА ТИТАНА γ-TiAl ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ СОПРОТИВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРОСЛОЕК

С.И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, И.В. ЗЯХОР, С.В. ЧЕРНОБАЙ, А.А. НАКОНЕЧНЫЙ, М.С. ЗАВЕРТАННЫЙ ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрены особенности формирования соединений сплава на основе интерметаллида ү-TiAl при контактной стыковой сварке сопротивлением с использованием промежуточных прослоек в виде фольг, отличающихся толщиной, химическим составом и структурным состоянием. Исследования выполняли на образцах сплава Ti-47Al-2Nb-2Cr (ат. %), полученных электронно-лучевым переплавом, как в состоянии поставки (литом), так и после термической обработки (температура 1250 °C, 6 ч). В качестве прослойки использовали титановую фольгу с микрокристаллической структурой толщиной 100, 200 и 400 мкм и наноструктурированные многослойные фольги — Ti/Al (52 % Ti-48 % Al, aт. %) и Ti/Co (75 % Ti-25 % Co, ат. %) толщиной $\delta = 30...160$ мкм. Эксперименты проводили на установке K802, параметры режима сварки изменяли в пределах: давление при нагреве $P_{\rm H}$ = 5...20 МПа, давление осадки $P_{\rm oc}$ = 20...100 МПа, величина осадки Δ_{oo} = 5...15 мм. Микроструктуру и химический состав соединений исследовали с помощью оптической и растровой электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа. Прочностные свойства металла в зоне соединений оценивали по распределению микротвердости и испытаний на разрыв. Установлено, что в зоне соединений сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb, выполненных с использованием сплошной титановой фольги, обнаруживается структурная неоднородность в виде сплошной прослойки титана и диффузионной зоны между прослойкой и свариваемым сплавом, содержащей цепочки пор. Использование наноструктурированных фольг Ті/АІ и Ті/Со обеспечивает формирование бездефектных соединений. Структура металла в зоне соединения — мелкозернистая бимодальная у/у+а, независимо от исходной структуры основного металла. Остатки наноструктурированных фольг системы Ti/Al присутствуют в зоне соединения в виде прослойки дисперсного интерметаллида ү-ТіАІ, не содержащего хрома и ниобия. При использовании фольги системы Ti/Co эвтектического состава (75 % Ti-25 % Co) химическая неоднородность в виде продуктов трансформации фольги в стыке не обнаруживается. При испытаниях соединений на разрыв разрушение происходит по основному металлу сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb. Участок соединения с повышенной твердостью во всех рассмотренных случаях совпадает с зоной структурных изменений в результате термодеформационного воздействия процесса сварки. Библиогр. 21, рис. 11

Ключевые слова: контактная стыковая сварка сопротивлением, алюминид титана, промежуточная прослойка, наноструктурированная многослойная фольга, сварное соединение

Одной из актуальных проблем является разработка процессов технологической обработки и получения неразъемных соединений интерметаллидных сплавов титана, в частности, гамма-сплавов на основе алюминида титана у-TiAl. Гамма-сплавы имеют высокие показатели жаропрочности (при 700...750 °C) и жаростойкости при относительно низкой плотности (3850 кг/ м^3) [1–3]. В зависимости от чистоты и микроструктуры механические свойства интерметаллида TiAl изменяются в широких пределах и составляют: $\sigma_{p} = 350...580 \text{ M}\Pi a$, $\delta = 0,5...1,5$ %, E = 175 ГПа, $\ddot{G} = 65$ ГПа. Предполагается использование гамма-сплавов для изготовления клапанов автомобильных двигателей, деталей авиационных двигателей, работающих при высоких температурах [4, 5].

Одной из причин, которая ограничивает использование алюминидов титана, является их низкая технологичность, в том числе сложность сварки, обусловленная чрезвычайно низкой пла-

стичностью, высокой чувствительностью к образованию трещин при термодеформационном воздействии. Соединения, полученные при дуговой сварке неплавящимся электродом [6] и электронно-лучевой сваркой [7], склонны к растрескиванию, развивающемуся по линии сплавления или околошовной зоне. Для снижения вероятности появления в соединениях алюминидов титана трещин при способах сварки плавлением необходим предварительный подогрев свариваемой конструкции до высоких температур [8].

При прессовой сварке интерметаллидного сплава γ-TiAl [9] сварные соединения отличаются низкой прочностью из-за образования хрупких строчечных выделений в зоне соединения. Основными проблемами получения работоспособных соединений алюминидов титана при сварке трением [10, 11] является образование микротрещин в зоне термомеханического влияния (3TMB) в процессе деформации и при охлаждении. При

© С.И. Кучук-Яценко, И.В. Зяхор, С.В. Чернобай, А.А. Наконечный, М.С. Завертанный, 2015



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



диффузионной сварке в вакууме (ДСВ) сплава Ti– 48Al–2Nb–2Mn в структуре переходной зоны чет-ко проявляется граница раздела, наблюдаются дефекты в виде микропор [12].

Низкая пластичность интерметаллидных сплавов обусловливает необходимость увеличения длительности нагрева и повышения термодеформационных параметров процесса ДСВ. Формирование соединений алюминидов титана без металлографически выявляемых дефектов при ДСВ достигается за счет длительной выдержки под давлением при температуре 1100...1200 °С и последующей высокотемпературной термической обработке [12, 13].

Чувствительность интерметаллидных сплавов к термодеформационному циклу сварки стимулирует технологов к поиску путей облегчения условий активации свариваемых поверхностей, прежде всего за счет интенсификации процесса локальной пластической деформации и ускорения диффузионных процессов в зоне контакта. Основным технологическим приемом при способах сварки давлением является использование промежуточных прослоек из различных материалов. Например, при ДСВ условия активации свариваемых поверхностей значительно облегчаются при введении между ними прослоек из пластичных материалов — алюминия, меди, никеля, титана [9, 14]. Проблемой при способах сварки давлением с использованием промежуточной прослойки из различных металлов является образование в сварном соединении химической неоднородности [9].

Эффект одновременного повышения интенсивности деформации и ускорения диффузионных процессов в зоне контакта достигают за счет использования прослоек из вакуумных конденсатов на основе многослойных структур, состоящих из элементов с высокой реакционной способностью [15-18]. Показано, что наименьшую химическую неоднородность в стыке обеспечивают многослойные наноструктурированные фольги (НФ) системы Ti/Al, полученные методом электронно-лучевого испарения и осаждения в вакууме из паровой фазы [18]. Так, при ДСВ сплава на основе γ-TiAl с использованием НФ системы Ti/Al обеспечивается формирование качественных соединений [16, 17] с прочностью, близкой к показателям основного материала (ОМ). Положительное влияние использования НФ при ДСВ связывают с интенсификацией процессов массопереноса в зоне контакта благодаря протеканию реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [19].

Применение ДСВ ограничивается необходимостью нагрева всего свариваемого изделия до значительных температур в вакуумной камере,

чрезвычайно высокими требованиями к подготовке свариваемых поверхностей, низкой производительностью процесса сварки. Поэтому актуальным вопросом является изучение возможности использования способов сварки давлением, обеспечивающих большую производительность и возможность качественного соединения различных материалов без применения защитной среды или вакуума.

К таким способам сварки давлением относится контактная стыковая сварка (КСС). В работе [20] изучали формирование соединений при КСС сопротивлением сплава Ti-47Al-1,5Cr-2Nb, полученного технологией электронно-лучевого переплава. Установлено, что использование НФ системы Ti/Al позволило существенно улучшить формирование соединений, сократить величину осадки образцов и длительность процесса КСС. Положительный эффект достигался благодаря более концентрированному выделению тепла в зоне контакта за счет протекания реакции СВС в НФ. Применение НФ позволило уменьшить энерговложение, локализовать деформацию в зоне контакта и избежать растрескивания. Однако в соединениях наблюдается значительный градиент твердости – значение микротвердости возрастает на 60% по сравнению с показателями ОМ [20]. При механических испытаниях разрушение происходит в переходной зоне между ЗТМВ и ОМ литого сплава. Можно предположить, что в этой зоне имеет место сочетание высокого уровня сварочных напряжений и крайне низкой пластичности металла литого сплава γ-TiAl с крупнокристаллической пластинчатой структурой.

Полученные результаты показывают перспективность использования НФ в качестве активаторов процесса КСС интерметаллидных сплавов титана. Для дальнейшего совершенствования технологии КСС являются актуальными исследования влияния состава и толщины НФ, а также исходной структуры свариваемого сплава на формирование соединений.

Цель работы — установить особенности формирования структуры соединений сплава γ-TiAl в различном исходном состоянии при КСС с использованием промежуточных прослоек, отличающихся химическим составом, структурным состоянием и толщиной.

Методика исследований. Исследования выполняли на образцах сплава Ti-47Al-2Nb-2Cr (ат.%), полученных электронно-лучевым переплавом (образцы квадратного сечения 10×10 мм). Первую партию образцов сваривали в состоянии поставки, вторую — перед проведением КСС отжигали при температуре ($\alpha+\gamma$)-области (1250 °C, 6 ч), в результате чего крупнокристаллическая



пластинчатая структура литого сплава трансформировалась в полностью зернистую структуру, отличающуюся более высокими показателями пластичности [2].

В качестве промежуточной прослойки при КСС использовали фольги трех видов, отличающихся химическим составом и структурным состоянием: титановую фольгу с микрокристаллической структурой и нанослойные — Ti/Al (52 % Ti–48 % Al, ат. %) и Ti/Co (75 % Ti–25 % Co, ат. %) (рис. 1). Толщина фольг составляла: титановой – 100, 200 и 400 мкм, НФ системы Ti/Al — δ = 30, 60 и 160 мкм, НФ Тi/Co — δ = 100 мкм. Различие состава фольг предопределяет различие температуры их плавления $T_{\rm пл}$ по сравнению с $T_{\rm пл}$ свариваемого сплава: более высокая (титановая фольга с $T_{\rm пл}$ = 1668 °C), равная (НФ системы Ti/Al, преобразующаяся при нагреве в интерметаллид TiAl с $T_{\rm пл}$ = 1460 °C), и меньшая (НФ системы Ti/Co, преобразующаяся в эвтектику с $T_{\rm пл}$ = 1170 °C).

Эксперименты по КСС сопротивлением проводили на лабораторной установке, созданной на базе сварочной машины К802. Значения тока и усилие сжатия регулировали компьютеризированной системой управления. Диапазон изменения технологических параметров был оптимизирован на основании предварительных экспериментов таким образом, чтобы обеспечить заданную деформацию (величину осадки) при сварке всех партий образцов. Параметры режима КСС изменяли в пределах: давление при нагреве $P_{\rm H} = 5...20~{\rm M}\Pi{\rm a}$, давление осадки $P_{\rm oc} = 20...100~{\rm M}\Pi{\rm a}$, величина осадки $\Delta_{\rm oc} = 5...15~{\rm mm}$.

Для оценки качества сварки использовали комплексную методику контроля [21], предусматривающую применение компьютеризированного операционного контроля параметров режима сварки, методов неразрушающего контроля сварных соединений и металлографические исследования. Микроструктуру и химический состав сварных соединений исследовали с помощью оптической микроскопии («Neophot-32»), растровой электронной микроскопии (JSM-35CA, «Jeol», Япония) и микрорентгеноспектрального анализа (EDS-анализатор «INCA-450» фирмы «Oxford Instruments», Великобритания с диаметром зонда около 1мкм). Прочностные свойства оценивали по распределению микротвердости (микротвердомер М400 фирмы «Leco») при нагрузке 2 Н.

Результаты исследования. Установлено, что при КСС сопротивлением литого сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb, имеющего полностью ламельную структуру, в зоне соединения наблюдались дефекты — непровары и цепочки пор. Образование дефектов при КСС без использования промежуточных прослоек наблюдалось при изменении технологических параметров во всем исследованном ди-

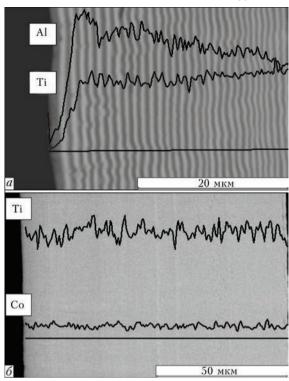


Рис. 1. Микроструктура наноструктурированных многослойных фольг Ti/Al (a), Ti/Co (δ)

апазоне и обусловлено высоким сопротивлением деформации и низкой пластичностью интерметаллидного сплава. При сварке предварительно термобработанных образцов условия формирования соединений улучшались, по-видимому, благодаря более высоким показателям пластичности сплава с полностью зернистой структурой, однако избежать образования дефектов не удалось (рис. 2, *a*).

На рис. 2, δ представлена микроструктура зоны соединения сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb, выполненного КСС с использованием промежуточной прослойки в виде титановой фольги. В структуре соединений трещин, непроваров, оксидных плен не обнаружено. Однако независимо от толщины применяемой фольги (в диапазоне 100...400 мкм) в зоне соединения обнаруживается химическая неоднородность в виде сплошной прослойки титана.

Наличие титановой фольги в зоне контакта при КСС сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb способствует локализации пластической деформации, активации свариваемых поверхностей и формированию бездефектных соединений. Однако полного вытеснения прослойки титана из стыка не наблюдается, в том числе при максимальных значениях усилия и величины осадки в исследованном диапазоне. Проведение послесварочной термической обработки соединений (1150 °C, 6 ч) полностью не устраняет химическую неоднородность, кроме того, приводит к образованию диффузионной зоны между прослойкой титана и ОМ сплава γ-TiAl (рис. 3). Ширина прослойки титана составляет 40...50 мкм, диффузионной зоны с перемен-



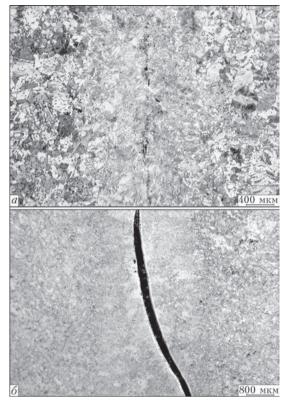


Рис. 2. Микроструктура соединения сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС без прослойки (a) и с использованием титановой фольги $\delta=400$ мкм (δ)

ной концентрацией Ti, Al, Cr, Nb — около 25 мкм. В диффузионной зоне обнаруживаются цепочки пор (рис. 3, a). По данным микрорентгеноспектрального анализа общая ширина зоны концентрационных изменений составляет около 100 мкм (рис. 3, δ). Образования химической неоднородности не удается избежать при КСС как литого, так и предварительно термообработанного сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb.

Микроструктура сварного соединения литого сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb (без предварительной термообработки), выполненного с использованием $H\Phi$ системы Ti/Al толщиной $\delta=60$ мкм, представлена на рис. 4. Каких-либо дефектов, в

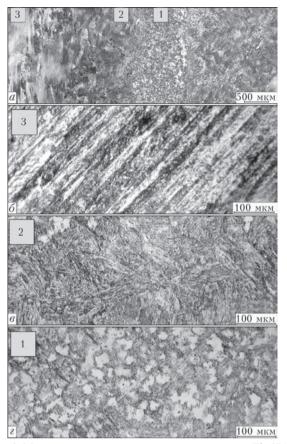


Рис. 4. Микроструктура соединения литого сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием НФ Ti/Al δ = 60 мкм: общий вид (a), ОМ (δ), переходная зона (a), зона мелкого зерна (a)

том числе пор, в зоне соединения не наблюдается. Структурные изменения в соединении охватывают зону общей шириной около 2,5 мм (рис. 4, a). Крупнокристаллическая полностью пластинчатая структура ОМ литого сплава преобразуется в зоне соединения в мелкозернистую бимодальную (смешанную) структуру, содержащую дисперсные продукты реакции СВС в НФ. Однофазные зерна γ -фазы (рис. 4, ϵ) окружены двухфазными участками γ + α , с пластинчатым строением.

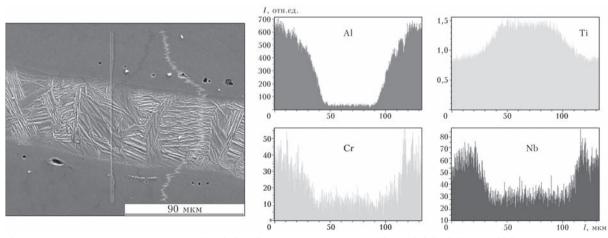


Рис. 3. Микроструктура и распределение Ti, Al, Cr, Nb в соединении сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием титановой фольги δ = 100 мкм (сканирующая электронная микроскопия)

<u> Двиоманическая</u>

9/2015



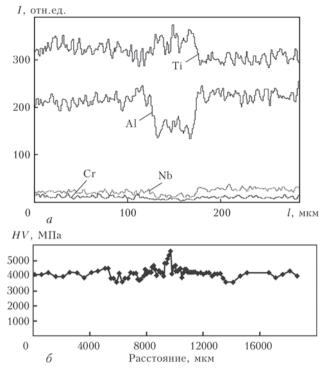


Рис. 5. Распределение Ti, Al, Cr, Nb (a) и микротвердости метала (δ) в зоне соединения литого сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb, выполненного КСС с использованием НФ системы Ti/Al (δ = 60 мкм)

Ширина зоны концентрационных изменений Ti, Al, Cr, Nb составляет около 50 мкм (рис. 5, a),

что свидетельствует о наличии дисперсных продуктов реакции СВС в НФ. Структура переходной зоны от ЗТМВ к ОМ — почти пластинчатая. Анализ микроструктуры соединения свидетельствует о завершенности реакции СВС в НФ по всему сечению свариваемых заготовок и неполном вытеснении продуктов превращения НФ из стыка в процессе КСС. Значения микротвердости металла (рис. 5, δ) в зоне соединения (HV2— 4800...5600 MПа) значительно превышают таковые для ОМ сплава (HV2 — 3700...4300 МПа). Участок соединения с повышенной твердостью совпадает с зоной структурных изменений в результате термодеформационного воздействия процесса КСС, что может свидетельствовать о роли высокотемпературной пластической деформации в изменении механических свойств сплава. Таким образом, при КСС литого сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb с использованием НФ системы Ті/А1 толщиной 60 мкм обеспечивается формирование бездефектных соединений, при наличии значительного градиента твердости (HV2 — 1100...1300 МПа) в 3TMB.

Микроструктура соединения предварительно термообработанного сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb, выполненного КСС с использованием НФ системы Ti/Al толщиной $\delta = 60$ мкм, представлена на рис. 6, a. Характер структурных изменений в

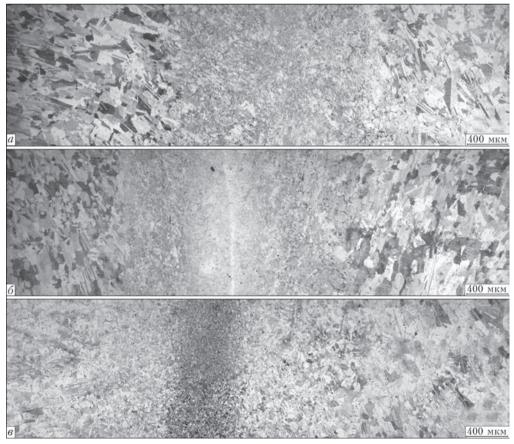


Рис. 6. Микроструктура соединения термообработанного сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием HΦ Ti/Al δ = = 60 мкм (a), HΦ Ti/Al δ = 160 мкм (δ), HΦ Ti/Co δ = 100 мкм (δ)



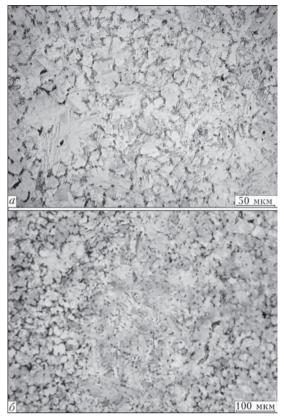
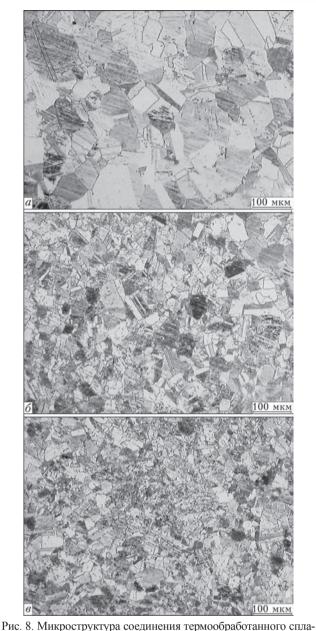


Рис. 7. Микроструктура металла в зоне мелкого зерна соединения термообработанного сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием НФ Ti/Al δ = 60 (a), Ti/Al δ = 160 мкм (δ)

зоне соединения аналогичен предыдущему случаю с той разницей, что в мелкозернистую бимодальную структуру (рис. 7, а) преобразуется исходная зернистая структура ОМ. Ширина зоны концентрационных изменений Ti, Al, Cr, Nb в соединении составляет около 40 мкм. Значения микротвердости металла в зоне соединения (HV3 — 4300...4700 МПа) также превышают таковые для ОМ сплава (HV3 — 3500...3800 МПа). Участок соединения с повышенной твердостью совпадает с зоной термодеформационного воздействия. Структура переходной зоны — бимодальная, в отличие от почти пластинчатой структуры переходной зоны соединения литого сплава. Градиент твердости в зоне соединения составляет HV2 — 800...900 МПа, что несколько меньше по сравнению с таковым при сварке литого сплава.

Аналогичная структура соединения при КСС термообработанного сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb с использованием $H\Phi$ системы Ti/Al толщиной $\delta=160$ мкм (рис. 6, δ). Выбор такой фольги обусловлен технологическими соображениями – использование $H\Phi$ большей толщины позволяет снизить требования к подготовке свариваемых поверхностей при КСС заготовок с большим поперечным сечением. Увеличение толщины используемой $H\Phi$ при заданном режиме КСС приводит к увеличению ширины зоны концентрационных изменений Ti, Al, Cr, Nb, которая в данном случае

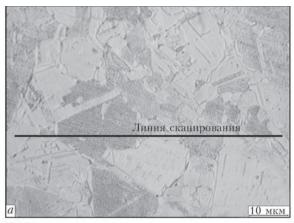


гис. 8. Микроструктура соединения термооораютанного сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием НФ Ti/Co δ = 100 мкм: ОМ (a), переходная зона (δ), зона мелкого зерна (ϵ) составляет около 120 мкм. Характер изменения

составляет около 120 мкм. Характер изменения микротвердости в зоне соединения аналогичен предыдущему случаю.

Структурные изменения в соединении термообработанного сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb, выполненном с использованием НФ эвтектического состава системы Ti/Co охватывают зону общей шириной не более 2,0 мм (рис. 6, θ). Металл в плоскости соединения, переходной зоне и ОМ имеет бимодальную $\gamma/\gamma+\alpha_2$ структуру с размером структурных элементов около 15, 35 и 110 мкм соответственно (рис. 8). В отличие от соединений, выполненных КСС с использованием НФ Ti/Al, продукты трансформации НФ Ti/Co в стыке при микрорентгеноспектральном анализе не обнаруживаются (рис. 9 и 10). Концентрация элементов поперек и вдоль зоны соединения соответствует таковой





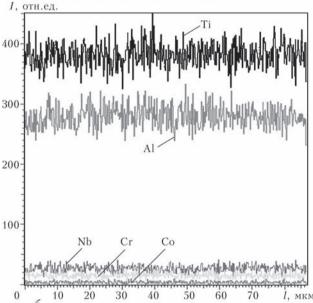
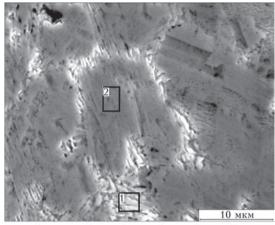


Рис. 9. Микроструктура (a) и распределение Ti, Al, Cr, Nb, Co в металле зоны соединения сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием НФ Ti/Co δ = 100 мкм (δ)

для ОМ сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb. Можно предположить, что в процессе деформации заготовок при КСС образующаяся жидкая фаза эвтектического состава в условиях сжатия и пропускания импульсов тока высокой мощности полностью вытесняется из стыка совместно с приконтактными объемами свариваемого сплава.

Положительная роль появления жидкой фазы эвтектического состава в процессе КСС, очевидно, проявляется, во-первых, в локальном повышении удельного электрического сопротивления металла в зоне контакта, что позволяет локализовать и интенсифицировать сдвиговую пластическую деформацию, во-вторых, в значительном повышении скорости массопереноса на границе раздела жидкой и твердой фазы. Наличие градиента твердости в зоне соединения HV2 — 700...900 МПа, как и в предыдущих случаях, свидетельствует о роли высокотемпературной пластической деформации в изменении механических свойств интерметаллидного сплава. При испытаниях соеди-



Спектр	Al	Ti	Cr	Nb
1	44,51	51,05	2,22	2,22
2	45,94	50,36	1,56	2,14

Рис. 10. Микроструктура и результаты EDS-анализа металла по линии соединения сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb при КСС с использованием НФ Ti/Co δ = 100 мкм

нений на разрыв разрушение происходит по ОМ сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb (рис. 11).

Анализ микроструктуры исследованных соединений показывает, что при КСС сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb с использованием НФ системы Ti/Al, преобразующейся в процессе КСС в интерметаллид γ -TiAl, металл в зоне соединения имеет мелкозернистую бимодальную $\gamma/\gamma+\alpha_2$ структуру независимо от исходной структуры ОМ. Увеличение толщины используемой НФ при заданном режиме КСС приводит к увеличению ширины зоны концентрационных изменений Ti, Al, Cr, Nb в зоне соединения.

Участок соединения с повышенной твердостью совпадает с зоной структурных изменений в результате термодеформационного воздействия процесса КСС и практически не зависит от толщины НФ. Микроструктура и величина градиента твердости металла переходной зоны от ОМ к участку мелкого зерна определяется структурой исходного металла заготовок. Проведение предварительной термической обработки свариваемых образцов обеспечивает незначительное снижение градиента твердости в зоне соединения.



Рис. 11. Образцы сварных соединений сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb после испытаний на разрыв



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Для снижения градиента микротвердости и стабилизации структуры металла сварных соединений проводят термическую обработку [17] при температуре, соответствующей ($\alpha+\gamma$)-области диаграммы состояния Ti–Al.

Выводы

- 1. При контактной стыковой сварке (КСС) сопротивлением литого сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb без использования промежуточной прослойки в зоне соединения наблюдались дефекты сварки во всем исследуемом диапазоне изменения значений технологических параметров.
- 2. В зоне соединений сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb, выполненных КСС сопротивлением с использованием сплошной титановой фольги, обнаруживается структурная неоднородность в виде сплошной прослойки титана и диффузионной зоны между прослойкой и свариваемым сплавом, содержащей цепочки пор.
- 3. Использование при КСС сплава Ti–47Al–2Cr–2Nb многослойной наноструктурированной фольги (НФ) системы Ti/Al (52 % Ti–48 % Al) толщиной 60...160 мкм обеспечивает формирование бездефектных соединений. В зоне соединения формируется мелкозернистая бимодальная γ / γ + α_2 структура независимо от исходной структуры OM. Остатки НФ присутствуют в зоне соединения в виде прослойки дисперсного интерметаллида γ -TiAl, не содержащего Cr, Nb.
- 4. При КСС с использованием НФ системы Ti/Co (75 % Ti-25 % Co) обеспечивается формирование бездефектных соединений, при этом химическая неоднородность в виде продуктов трансформации фольги в стыке не обнаруживается. При испытаниях соединений на разрыв разрушение происходит по ОМ сплава Ti-47Al-2Cr-2Nb.
- 5. Участок соединения с повышенной твердостью во всех рассмотренных случаях совпадает с зоной структурных изменений в результате термодеформационного воздействия процесса КСС.
 - Иванов В.И., Ночовная В.А. Интерметаллиды на основе титана (анализ состояния вопроса) // Титан. – 2007. – № 1 – С. 44–48.
 - 2. Полькин И.С., Колачев Б.А., Ильин А.А. Алюминиды титана и сплавы на их основе // Технол. легк. славов. 1997. № 3. С. 32—39.
 - Dimiduk D.M. Gamma titanium aluminides an emerging materials technology // Gamma titanium aluminides. Annual Meeting TMS'95. – Las Vegas, 1995. – P. 3–20.
- 4. *Иванов В.И., Ясинский К.К.* Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti₃Al

- и TiAl для работы при температурах 600...800 °С в авиационной технике // Технол. легк. сплавов. 1996. № 3. С. 7–12.
- Павлинич С.П., Зайцев М.В. Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. 2011. 15, № 4. С. 200–202.
- 6. Arenas M.F., Acoff V.L. Analysis of gamma titanium aluminide welds produced by gas tungsten arc welding // Welding J. −2003. № 5. P. 110–115.
- 7. *Titanium* aluminide: electron beam weldability / R.A. Patterson et al. // Welding J. − 1990. − № 1. − P. 39–44.
- 8. Выбор температуры предварительного подогрева γ -алюминида титана при ЭЛС / В.Н. Замков, Е.А. Великоиваненко, В.К. Сабокарь и др. // Автомат. сварка. 2001. № 11. С. 20—23.
- Сварка давлением интерметаллидного сплава γ-TiA1 / А.Н. Юштин, В.Н. Замков, В.К. Сабокарь и др. // Там же. – 2001. – № 1. – С. 33–37.
- Miyashita T., Hino H. Friction welding characteristics of TiAl intermetallic compound // J. Japan Inst. Metals. – 1994. – 58, № 2. – P. 215–220.
- Linear friction welding of Ti-48Al-2Cr-2Nb (at. pct) titanium aluminide' / W.A. Baeslack, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas, T.F. Broderick // Proc. of 'Titanium '95 Science and Technology', Birmingham, UK, 22-26 Oct. 1995, Institute of Materials. 1996. P. 424-431.
- 12. *Gam G., Bohm K.N., Kocak M.* Diffusionsschweiben fein gegossener Titanaluminide // Schweissen ubd Schneiden. 1999. № 8. S. 47–475.
- Nakao Y., Shinozaki K., Hamada M. Diffusion bonding of intermetallic compound TiAl // Proc. of the 3rd Intern. confe. on trends in welding research. – Gattinburg, Tennessee, USA June 1–5, 1992. – ASM International Materials Park, Ohio, 1992. – P. 1057–1061.
- 14. *Yan P., Somekh R.E., Wallach E.R.* Solid state bonding of TiAl with interlayers // Там же. P. 1063–1067.
- 15. *Solid-state* diffusion bonding of γ-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers / L.I. Duarte, A.S. Ramos, M.F. Vieira et al. // Intermetallics. 2006. № 14. P. 1151–1156.
- 16. Устинов А.И. Получение неразъемных соединений сплавов на основе γ-TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме / А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, А.Я. Ищенко и др. // Автомат. сварка. 2009. № 1. С. 17–21.
- Многослойные фольги Ті/АІ: Способы получения, свойства и применение при сварке давлением / А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, Т.В. Мельниченко и др. // Спецэлектрометаллургия. 2012. № 1. С. 30–37.
- 19. Дослідження дифузійних процесів у зварних з'єднаннях алюмініду титану (TiAl)/ Г.К. Харченко, В.Ф. Мазанко, А.І. Устінов та ін. // Вісн. ЧДТУ. Сер. Технічні науки. 2009. № 37. С. 117–119.
- 20. Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминиево-титановых фольг / В.С. Кучук-Яценко, В.И. Швец, А.Г. Сахацкий, А.А. Наконечный // Автомат. сварка. 2009. № 3. С. 19–22.
- 21. *Кучук-Яценко С.І., Зяхор І.В., Завертанний М.С.* Контроль якості з'єднань, виконаних зварюванням тиском з використанням наноматеріалів // Стандартизація, сертифікація, якість. 2015. № 1. С. 38–41.

Поступила в редакцию 21.04.2015





УЛК 621.791.4:539.378.3

ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА СТАЛИ С ОЛОВЯННОЙ БРОНЗОЙ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ ПРОСЛОЙКИ НИКЕЛЯ И МЕДИ

А.И. УСТИНОВ, Ю.В. ФАЛЬЧЕНКО, Т.В. МЕЛЬНИЧЕНКО, Л.В. ПЕТРУШИНЕЦ, К.В. ЛЯПИНА, А.Е. ШИШКИН, В.П. ГУРИЕНКО

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Узлы трения с биметаллической структурой на основе стали и бронзы широко используются во многих механических системах. Соединения стали и бронзы получают методом диффузионной сварки при температурах 750...850 °C. Образование дефектов в зоне соединения в ряде случаев связывают с высокой температурой сварки. На примере получения неразъемных соединений стали (20ХЗМВФ) и бронзы (БрОСН 10-2-3) в работе рассмотрена возможность снижения температуры диффузионной сварки путем применения промежуточных прослоек. В качестве промежуточных прослоек использованы пористые фольги никеля и меди, полученные вакуумным осаждением. Показано, что применение таких промежуточных пористых прослоек позволяет снизить температуру сварки до 660...700 °C. Снижение температуры сварки предотвращает рост ликвационных образований олова и свинца в области зоны соединения, что снижает вероятность образования дефектов. Полученные таким образом соединения стабильны при кратковременном нагреве до температур 800...850 °C, что позволяет в последующем проводить термическую обработку стали в составе композиционного материала для повышения ее прочностных свойств. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: биметаллические соединения, сталь, бронза, пористые прослойки, диффузионная сварка, режимы сварки, структура соединения

Биметаллические материалы, состоящие из стали и оловянной бронзы, полученные диффузионной сваркой, широко применяются в механических системах (узлах трения). Такая композиционная структура материала позволяет обеспечить деталям сочетание высокой прочности и низкого коэффициента трения. Надежность и долговечность эксплуатации деталей с биметаллической структурой зависит от качества соединения компонентов стали и оловянной бронзы.

Согласно данным работы [1] структура оловянной бронзы БрОСН10-2-3 состоит из а-твердого раствора и включений эвтектоида α+Сu₂Sn (или α +Cu₃₁Sn₈). В ее состав входит также никель и олово. Никель, добавляемый в бронзу, увеличивает количество эвтектоида, но не образует новых фаз, находясь в составе твердого раствора. Свинец, нерастворимый в меди, присутствует в виде отдельных включений. Затруднения при сварке стали и оловянной бронзы, легированной свинцом, связывают с повышенной склонностью бронзы к ликвации, оплавлением поверхности бронзы уже при температуре 760...780 °C вследствие наличия свинца, а также вероятностью возникновения «эффекта Ребиндера» при проникновении меди в межкристаллитное пространство стали.

Известна технология сварки оловянной бронзы со сталью в режиме твердо-жидкого состояния при температурах $T_{\rm cB}=870...880~^{\circ}{\rm C}$ и выдержке в течение $t_{\rm cB}=15$ мин [2].

Авторы работы [3] для получения соединений бронзовой втулки с корпусом подшипника скольжения разработали технологию, которая предусматривает запрессовку втулки в стальной корпус с последующим дорнированием, что обеспечивает на границе сталь-бронза протекание локализованной пластической деформации. Затем проводят диффузионную сварку при $T_{\rm cB}=750~{\rm ^{\circ}C},\,t_{\rm cB}=30~{\rm Muh}.$

Известны технологии сварки стали с бронзой с применением промежуточных прослоек из меди и никеля или гальванических покрытий никеля. Так, например, при сварке стали $40\mathrm{X}$ с бронзой БрОСН10-2-3 рекомендуется наварка медной прослойки (толщиной 1 мм) к стали при $T_{\mathrm{CB}} = 900\,^{\circ}\mathrm{C}$, $P_{\mathrm{CB}} = 10$ МПа, $t_{\mathrm{CB}} = 20$ мин, а затем приварка сборки к бронзе при $T_{\mathrm{CB}} = 750\,^{\circ}\mathrm{C}$, $P_{\mathrm{CB}} = 5$ МПа, $t_{\mathrm{CB}} = 10$ мин, что позволяет получить сварные соединения с прочностью на отрыв 229 МПа [4].

Из проведенного анализа видно, что соединения стали и бронзы получают в процессе диффузионной сварки при повышенных температурах, что может способствовать увеличению ликвационных неоднородностей в бронзе или формированию жидкой фазы в зоне соединения. Это приводит к снижению прочности соединения и зависимости его качества от исходного состояния бронзы. Одним из путей предотвращения развития негативных процессов может быть снижение температуры сварки. Однако даже в случае активации диффузионных процессов в зоне соединения путем совместной деформации свариваемых образцов при

© А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, Т.В. Мельниченко, Л.В. Петрушинец, К.В. Ляпина, А.Е. Шишкин, В.П. Гуриенко, 2015



прокатке не удается обеспечить соединение материалов при температуре ниже 750 °C [5].

Вместе с тем в ряде работ показано, что применение промежуточных прослоек на основе пластичных материалов может способствовать смягчению условий получения неразъемных соединений [6]. В качестве таких промежуточных прослоек могут быть использованы также и пористые материалы [7]. С учетом этих результатов в работе рассмотрена возможность снижения температуры диффузионной сварки стали и оловянной бронзы через промежуточные прослойки никеля и меди с пористой структурой и изучены особенности формирования микроструктуры зоны соединения.

Материалы и методы исследования. Диффузионную сварку в вакууме образцов стали 20ХЗМВФ (в дальнейшем сталь) и оловянной бронзы БрОСН 10-2-3 (в дальнейшем бронза) проводили по методике, описанной в работе [8]. Параметры процесса сварки были следующие: температуру сварки изменяли в диапазоне $T_{\rm cb}=600...800$ °C, продолжительность сварки $t_{\rm cb}=5...20$ мин, сварочное давление $P_{\rm cb}=10...20$ МПа, вакуум в рабочей камере поддерживали на уровне $1,33\cdot10^{-3}$ Па.

Тонкие фольги никеля и меди получали электронно-лучевым вакуумным осаждением по методике, детально описанной в работе [9].

Анализ структурных характеристик фольги и сварных соединений проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа CAMSCAN 4, оснащенного системой энергодисперсионного анализа Oxford Inca Energy 200 для определения химического состава на плоских образцах. Для этого по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального оборудования фирмы «Struers» были приготовлены шлифы поперечного сечения фольг и сварных соединений. Деформационное поведение тонких фольг в процессе нагрева в условиях постоянно действующих растягивающих нагрузок оценивали с помощью дилатометрической установки, оснащенной специальным устройством [10]. Величину нагрузки выбирали как 1/10 от приложенного давления, что составляет порядка 2...4 МПа при диффузионной сварке под давлением 20...40 МПа.

Измерение микротвердости сварных соединений по методу Виккерса проводили с использованием оптического микроскопа PolivarMet, оснащенного приставкой для измерения микротвердости, при нагрузке на индентор P = 0,098 H.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Согласно данным работы [11], одним из способов производства биметаллических блоков цилиндров гидромашин является диффузионная сварка деталей из оловянной бронзы и стали, ко-

торую выполняют при температуре 870 ± 10 °C в течение 50 мин под постоянным давлением при погружении сборок в соляную ванну. После завершения процесса сварки детали подвергают закалке в масло, что позволяет повысить твердость стали до необходимого уровня.

На рис. 1 приведена типичная микроструктура дефектного сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой при $T_{\rm cs}=860~{\rm ^oC}$ с последующей закалкой. Высокая температура сварки приводит к ликвации олова и свинца по границам зерен бронзы с последующим их испарением, что наряду с термическими напряжениями, возникающими при закалке соединения от температуры сварки, способствует появлению разрывов и несплошностей в области сварного шва. В работе [12] на примере нержавеющей стали нами было показано, что применение пористой фольги никеля позволяет снизить температуру диффузионной сварки.

Характеристика пористых фольг. В работе использовали пористые фольги никеля и меди, полученные электронно-лучевым осаждением из паровой фазы. Характерная микроструктура поперечного сечения фольг представлена на рис. 2. Видно, что микроструктура фольг после осаждения (рис. 2, a, b) характеризуется столбчатой структурой зерен, поперечное сечение которых составляет порядка $2\dots 3$ мкм, на границе которых наблюдаются открытые поры вытянутой формы, проходящие через всю толщину фольги.

В работе [12] на примере вакуумных конденсатов никеля было показано, что условия получения таких фольг (низкая температура осаждения $T_{\rm o}, T_{\rm o} < 0.3 T_{\rm nn},$ где $T_{\rm nn}$ — температура плавления осаждаемого металла) способствуют формированию в ней структурно-неравновесного состояния. Поэтому при незначительном нагреве таких фольг в них наблюдаются структурные изменения, сопровождающиеся процессами коалесценции и залечивания пор. В результате протекания этих процессов характеристики пористой структуры

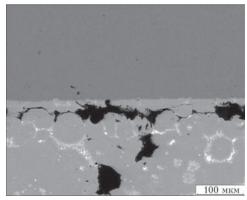


Рис. 1. Микроструктура сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой при температуре $T_{\rm cs}$ = $860\,^{\circ}{\rm C}$ + закалка

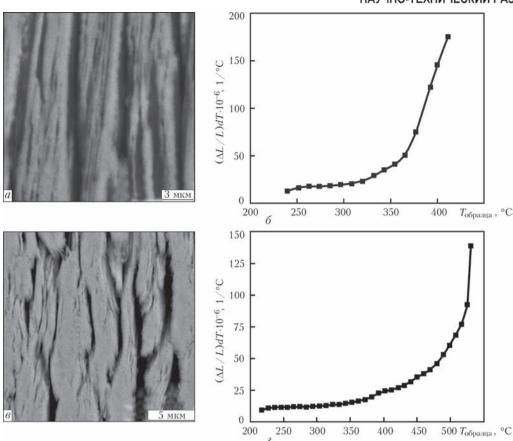


Рис. 2. Микроструктура и скорость деформации образцов пористой фольги на основе меди (пористость 30 % об.) (a, δ) и никеля (пористость 25 % об.) (a, ε)

изменяются — наблюдается переход от открытой к закрытой пористости, а форма пор изменяется с вытянутой на сферическую.

Исследования деформационного поведения пористой фольги никеля и меди при нагреве в условиях постоянно действующих растягивающих напряжений (порядка 2...4 МПа) показали, что скорость пластического течения фольги немонотонно зависит от температуры. Как видно из рис. 2, б, г скорость деформации фольг при повышении температуры изменяется следующим образом: до температуры 380 и 450 °C для фольг меди и никеля соответственно, она остается на уровне коэффициента термического расширения металла (растягивающие напряжения ниже предела текучести фольги), а выше указанных температур скорость их деформации резко возрастает и приобретает экспоненциальную зависимость. Такое деформационное поведение фольг при нагреве характерно для материалов при переходе их в сверхпластичное состояние, при котором пластическая деформация осуществляется преимущественно по механизму межзеренного проскальзывания. В случае чистых металлов структурная сверхпластичность проявляется при их нагреве выше $0.5T_{\rm mg}$. Локализация пластической деформации по границам зерен в процессе сверхпластического течения материалов сопровождается образованием пор, что, в свою очередь, способствует межзеренному проскальзыванию [13]. Основываясь на этом, можно предположить, что более низкая температура перехода пористой фольги в сверхпластичное состояние, по сравнению с массивными материалами, может быть обусловлена наличием в них пор.

Исходя из этого, предположили, что промежуточные прослойки с пористой структурой будут способствовать развитию пластических деформаций в зоне соединения при более низких температурах по сравнению с температурами, при которых становится возможным протекание пластической деформации стали или бронзы, что является необходимым условием для установления физического контакта между соединяемыми поверхностями и активизации в них диффузионных процессов, а это, в свою очередь, будет способствовать снижению температуры сварки. Кроме того, на снижение температуры сварки может оказывать влияние и повышенная структурная неустойчивость вакуумных конденсатов.

Характеристика сварных соединений. На рис. 3 представлены микроструктуры сварных соединений сталь/бронза, полученных через пористую фольгу никеля с пористостью 25 % об. и толщиной 50 мкм при различных режимах сварки. Видно (рис. 3, a), что применение пористой про-



слойки никеля обеспечивает формирование соединения сталь/бронза уже при температуре сварки 660 °С. Можно заметить, что температура сварки несколько выше, чем температура перехода пористой фольги никеля в сверхпластичное состояние (450...500 °С). Учитывая, что для формирования неразъемных соединений при диффузионной сварке необходимо обеспечить условия для взаимопроникающего роста зерен между свариваемыми поверхностями, можно предположить, что при температуре перехода промежуточной прослойки в сверхпластичное состояние скорость протекания диффузионных процессов является недостаточной для обеспечения этих условий. В пользу такого за-

ключения свидетельствуют и результаты исследования микроструктуры зоны соединения.

Из фазового контраста на изображении микроструктуры области соединения можно видеть, что при температуре сварки происходит взаимная диффузия компонентов свариваемых образцов и фольги. В результате диффузионного взаимодействия никелевой фольги со свариваемыми поверхностями она насыщается атомами железа со стороны стали, а со стороны бронзы — атомами меди (рис. 3, δ). В области соединения формируется диффузионная зона, неоднородная по химическому составу. Кроме того, в диффузионной зоне наблюдаются поры.

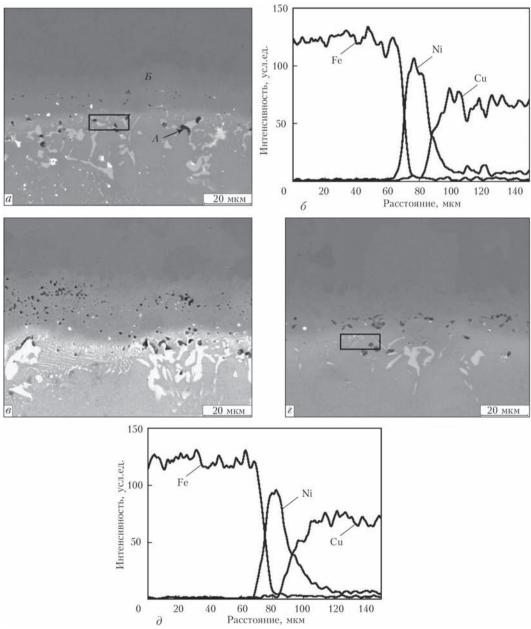


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой с использованием промежуточной прослойки пористого никеля (пористость 25 % об., толщина 50 мкм) на режимах: $a - T_{\rm cB} = 660$ °C, $t_{\rm cB} = 30$ мин; δ — распределение основных компонентов материалов в области соединения; $\epsilon - T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 5$ мин; $\epsilon - T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 20$ мин; $\epsilon - T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 70$



19

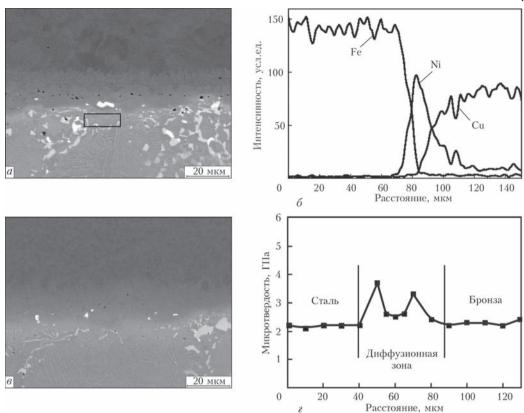


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой с использованием промежуточной прослойки пористого никеля на режиме: $T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 20$ мин: a — пористость 25 % об., толщина 20 мкм и соответствующее распределение основных элементов в области стыка (δ); ϵ — пористость 10 % об., толщина 20 мкм и распределение микротвердости в зоне соединения (ϵ)

Низкая температура сварки не обеспечивает залечивание пор как в никелевой прослойке, так и пор в околошовной зоне, возникающих при объединении вакансий, которые образуются в результате несбалансированности диффузионных потоков атомов меди в никель и никеля в бронзу (эффект Киркендалла). При этом обращает на себя внимание то, что скопления вакансий (поры) формируются на границах зерен медного сплава в области границы бронза/никелевая фольга (рис. 3, а, А). В области диффузионной зоны со стороны стали поры отсутствуют (рис. 3, a, Б). Появление пор в области границы бронза/никелевая фольга можно объяснить тем, что диффузия никеля в бронзу стимулирует формирование эвтектоидной составляющей. Так, химический анализ этой зоны показал (таблица), что концентрация никеля в ней значительно выше, чем в материале бронзы. В результате формирования эвтектоида появляется дополнительный приток вакансий, который обеспечивает коалесценцию пор. При повышении температуры сварки до 700 °C объемная доля эвтектоида в области диффузионной зоны бронза/ никелевая фольга увеличивается (рис. 3, в). При этом малая продолжительность сварки (5 мин.) недостаточна для залечивания пор в области соединения. Видно, что пористость промежуточной прослойки и диффузионной зоны в области границы бронза/никелевая фольга выражена в большей степени по сравнению со сваркой при 660 °C, 30 мин. (рис. 3, a, b). При увеличении времени выдержки при температуре 700 °C пористость уменьшается как в области промежуточной прослойки, так и в области границы бронза/никелевая фольга (рис. 3, г). С одной стороны диффузионная зона бронза/никелевая фольга расширяется,

Химический состав зоны соединения вблизи границы прослойка/бронза

Режим сварки/Промежуточная прослойка	Химический состав области соединения (обозначена прямоугольником на изображении микроструктур), мас. %					
	Fe	Ni	Cu	Sn	Pb	
$T_{\rm cB}$ = 660 °C, $t_{\rm cB}$ = 30 мин / Ni — пористость 25 %об., толщина 50 мкм	0,26	45,41	42,01	10,67	1,65	
$T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 20$ мин / Ni — пористость 25 % об., толщина 50 мкм	0,59	40,01	46,21	13,19	_	
$T_{\rm CB}$ = 700 °C, $t_{\rm CB}$ = 20 мин / Ni — пористость 25 % об., толщина 20 мкм	0,45	37,05	50,73	11,77	_	
$T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 20$ мин / Cu — пористость 30 % об., толщина 30 мкм	1,27	3,06	87,22	8,45	_	
Бронза	_	4,01	83,38	10,23	2,38	



при этом содержание никеля на единицу объема уменьшается, о чем свидетельствует уменьшение концентрации никеля (таблица), что приводит к уменьшению объемной доли эвтектоида в области границы фольга/бронза, а, следовательно, уменьшается приток вакансий за счет эвтектоидного превращения. С другой стороны увеличение времени выдержки обеспечивает частичное залечивание пор, но этого оказывается недостаточно для полного устранения пористости.

Очевидно, что для устранения остаточной пористости в области соединения необходимо уменьшить объемную долю пор и вакансий, связанных с присутствием в стыке пористой промежуточной фольги. Это можно решить двумя путя-

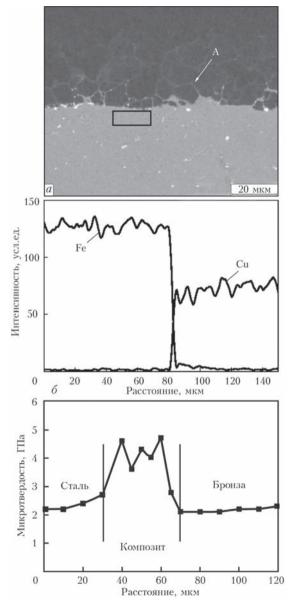


Рис. 5. Микроструктура сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой с использованием промежуточной прослойки пористой меди (пористость 30 % об., толщина 30 мкм) на режиме: $T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 20$ мин (a), распределение основных элементов (δ) и микротвердости (ϵ) в зоне соединения

ми: во-первых, уменьшением толщины фольги, а во-вторых, уменьшением ее пористости.

На рис. 4, а показана микроструктура сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой на режиме $T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} =$ = 20 мин с использованием промежуточной никелевой фольги с пористостью 25 % об. и толщиной 20 мкм. Применение более тонкой пористой фольги обеспечивает уменьшение остаточного слоя никеля в зоне соединения (рис. 4, б). При этом уменьшается пористость в области фольги и в диффузионной зоне со стороны бронзы, что может быть следствием как уменьшения объемной доли эвтектоида за счет снижения концентрации никеля в этой области (таблица), так и залечивания пор. При применении прослоек с меньшей пористостью (порядка 10 % об.) и толщиной 20 мкм существенно снижается концентрация пор как в области промежуточной прослойки, так и вблизи границы никелевая прослойка/бронза (рис. 4, в). Неоднородный состав диффузионной зоны сказывается на распределении микротвердости в области соединения (рис. 4, г). Видно, что взаимная диффузия компонентов стали, бронзы и промежуточной прослойки приводит к формированию в зоне соединения участков материала с более высокой микротвердостью, чем у исходных материалов.

Со стороны стали диффузионное взаимодействие железа и никеля приводит к образованию частиц интерметаллического соединения FeNi₂, что обеспечивает дисперсионное упрочнение материала. Взаимная диффузия меди и никеля приводит к формированию в стыке материала, близкого по составу к высокопрочному сплаву Монель. Полученные результаты дают основание утверждать, что использование при диффузионной сварке стали и бронзы промежуточной пористой прослойки никеля интенсифицирует диффузионные процессы в области соединения. С одной стороны этому способствует установление хорошего физического контакта свариваемых поверхностей за счет сверхпластического поведения пористой фольги, с другой — релаксация неравновесного состояния фольги путем коалесценции и залечивания пор активизирует диффузионное взаимодействие компонентов материалов в зоне соединения. Применение пористой фольги никеля позволяет снизить температуру сварки, что предотвращает появление жидкой фазы на поверхности бронзы и увеличивает прочность соединения.

Известно [4], что одним из способов, предотвращающих появление на поверхности бронзы жидкой фазы в процессе сварки, является наварка на поверхность стали медной прокладки малой толщины. В связи с этим представляет интерес использование в качестве промежуточной про-

ABTOMATURIEGRASI

слойки при диффузионной сварке стали и бронзы пористой фольги меди. На рис. 5, а показана микроструктура сварного соединения сталь/бронза, полученного диффузионной сваркой с использованием промежуточной прослойки меди с пористостью 30 % об. и толщиной 30 мкм при режиме сварки: $T_{\rm cB} = 700$ °C, $t_{\rm cB} = 20$ мин. Видно, что в зоне соединения отсутствует остаточная пористость. Отсутствие в зоне соединения прослойки на основе меди и четко выраженной диффузионной зоны свидетельствует об интенсивной взаимной диффузии компонентов соединяемых материалов и медной фольги. Исходя из распределения элементов в зоне соединения (рис. 5, б) и данных о химическом составе со стороны бронзы (таблица), можно отметить, что в области расположения промежуточной прослойки меди концентрация легирующих элементов практически такая же, как и в бронзе, т. е. между пористой прослойкой меди и бронзой в процессе диффузионной сварки происходит интенсивное перераспределение элементов, что способствует залечиванию пор. В то же время фазовый контраст на изображении микроструктуры соединения (рис. 5, а, А) указывает на диффузию меди по границам зерен стали.

Таким образом, из проведенных исследований можно сделать вывод, что в процессе сварки диффузионное взаимодействие промежуточной прослойки пористой меди на границе сталь/медь определяется зернограничной диффузией меди в сталь, а на границе с бронзой — диффузией олова и никеля из бронзы в медь. Диффузионное перераспределение компонентов в процессе сварки приводит к формированию в зоне соединения прослойки композита на основе стали с высокой микротвердостью. Можно предположить, что такое изменение механических свойств в сварном соединении будет способствовать локализации пластической деформации под действием внешней нагрузки, главным образом, в участках бронзы, непосредственно примыкающих к стали. Более плавное изменение микротвердости в области соединения сталь/бронза, полученного с использованием промежуточной прослойки пористого никеля, по-видимому, обеспечит более размытую область протекания релаксационных процессов при внешних нагружениях.

Выводы

1. Применение промежуточных прослоек на основе пористой фольги никеля и меди позволяет

снизить температуру диффузионной сварки сталь/ бронза до 660...700 °C.

- 2. Показано, что при диффузионной сварке стали и бронзы через пористою фольгу никеля структура сварного соединения формируется со стороны стали путем взаимной диффузии атомов никеля и железа, а со стороны бронзы атомов никеля и меди, что приводит к формированию в области стыка прослоек материала с повышенной микротвердостью.
- 3. Структура сварного соединения сталь/бронза, полученного через промежуточную прослойку пористой меди, формируется путем зернограничной диффузии атомов меди в сталь и диффузии атомов никеля и олова в медь, что способствует формированию в зоне соединения композита с высокой микротвердостью.
- 1. *Казаков Н.Ф.* Диффузионная сварка материалов. М.: Металлургия, 1976. 312 с.
- 2. *Малевский Ю.Б., Несмих В.С.* Сварка давлением бронзы со сталью. М.: Металлургия, 1981. 108 с.
- 3. *Потехин Б.А., Измайлов Д.К.* Особенности диффузионной сварки в вакууме без приложения внешнего давления // Свароч. пр-во. 2008. № 2. С. 8–13.
- 4. *Казаков Н.Ф.* Диффузионная сварка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
- 5. *Биметаллические* соединения / К.Е. Чарухина, С.А. Голованенко, В.Е. Мастеров, Н.Ф. Козаков. М.: Металлургия, 1970. 254 с.
- 6. Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al₂O₃ particles through an Al/Cu multilayer foil / A. Ustinov, Y. Falchenko, T. Melnichenko et al. // J. of Materials Processing Technology. − 2013. − **213**, № 4. − P. 543–552.
- 7. *Люшинский А.В.* Использование нанодисперсных порошков при диффузионной сварке разнородных металлов // Автомат. сварка. 2011. № 5. С. 39–43.
- Диффузионная сварка в вакууме сплава на основе γ-TiAl с использованием нанослойных прослоек / Г.К. Харченко, А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, и др. // 2011. № 3. С. 7–11.
- Устинов А.И., Ляпина К.В., Мельниченко Т.В. Закономерности формирования пористой структуры нержавеющей стали при ее осаждении из паровой фазы в присутствии паров хлористого натрия // Спец. электрометаллургия. 2005. № 4. С. 23–28.
- Исследование фазовых превращений и пластических деформаций при непрерывном нагреве многослойной фольги АІ/Си / А.И. Устинов, Я.И. Матвиенко, С.С. Полищук, А.Е. Шишкин // Автомат. сварка. – 2009. – № 10. – С. 29–34.
- 11. *Вайвод Н.И., Быков Г.М.* Диффузионная сварка при изготовлении блока цилиндров аксиально-плунжерных насосов // Свароч. пр-во. 1982. № 3. С. 32–33.
- 12. Диффузионная сварка в вакууме нержавеющей стали через пористые прослойки никеля / А.И.Устинов, Ю.В. Фальченко, Т.В. Мельниченко и др. // Автомат. сварка. 2015. № 7. С. 1—7.
- Кузнецова Р.И., Брюховецкий В.В., Пойда В.П. Механизмы развития зернограничных пор и локальная неоднородность деформации в условиях сверхпластического течения // Металлофизика и новейшие технологии. 1995. 17, № 8. С. 64–72.

Поступила в редакцию 30.04.2015



УЛК 621.791.92

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВАЛИКА ПРИ НАПЛАВКЕ НА УЗКУЮ ПОДЛОЖКУ

К.А. ЮЩЕНКО, А.В. ЯРОВИЦЫН, Г.Д. ХРУЩОВ, А.А. ФОМАКИН, Ю.В. ОЛЕЙНИК ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail:office@paton.kiev.ua

При натурном моделировании технологически вероятных поперечных сечений валиков, наплавленных на узкую подложку шириной 0,5...5,0 мм, выполнен анализ геометрических закономерностей их формирования. Уточнены задачи для технологического управления формой однослойного валика и сформулирован ряд технологических критериев: эффективного наращивания наплавляемой узкой подложки, оптимальной полезной площади поперечного сечения валика и приемлемых боковых припусков на механическую обработку. Предложены формулы для оценочных инженерных расчетов, устанавливающие взаимосвязь между требуемой высотой наплавленного слоя, размерами валика, массой наплавленного металла и расходом присадки. Библиогр. 16, табл. 3, рис. 9.

Ключевые слова: микроплазменная порошковая наплавка; никелевые жаропрочные сплавы; узкая подложка; натурное моделирование поперечного сечения валика; технологические критерии формы валика

Значительный объем работ при ремонте деталей авиационных газотурбинных двигателей приходится на восстановление или упрочнение их уплотнительных и антивибрационных элементов шириной 0,5...5,0 мм и длиной от 10...15 мм до 2...3 м. Для решения данных задач достаточно широко применяется аргонодуговая [1, 2] или микроплазменная порошковая наплавка [3-5] с использованием в качестве присадки никелевых жаропрочных сплавов. Она выполняется в условиях свободного формирования валика на вертикально установленном конструктивном элементе детали. Под воздействием сил тяжести, давления дуги, внутреннего трения расплавленного металла (вязкость) и поверхностного натяжения в процессе наплавки формируется валик, контур поперечного сечения которого приближен к окружности или эллипсу (рис. 1). Для таких наплавляемых поверхностей в ИЭС им. Е.О. Патона принят специальный термин: «узкая подложка» — элементы поверхности основного металла, ширина которых не превышает ширины сварочной ванны [6, 7].

Для расширения представлений о геометрических и технологических закономерностях формирования наплавляемых на узкую подложку валиков для ограниченно свариваемых никелевых жаропрочных сплавов [8, 9] рассмотрим пример трехслойной микроплазменной порошковой наплавки фрагмента торца пера лопатки (рис. 2). Анализ режимов наплавки, выполненный по методике работы [10], показывает, что при ограниченном изменении сварочного тока (1...3 A) рост размеров поперечного сечения наплавляемого валика из сплава ЖСЗ2 в пределах 2...4 мм сопровождается значительным увеличением тепловло-

жений. В свою очередь, возрастание более чем в 2 раза введенной за время горения дуги тепловой энергии способствует образованию микротрещин в наплавленном металле при последующей термической обработке по режиму гомогенизации для сплавов ЖС26 и ЖС32.

Ввиду того, что механизм технологического управления поперечным сечением наплавленного металла при наплавке узкой подложки шириной $\delta = 0.5...5,0$ мм на данный момент изучен лишь фрагментарно [2, 3, 11], для формирования соответствующих представлений о целях и задачах такого управления целесообразно первоначально проанализировать ожидаемую форму наплавленных валиков в диапазоне его относительной ширины $B/\delta = 1...10$ и относительной высоты $H/\delta \le 4$. Эти показатели характеризуют совокупность размеров поперечных сечений валиков, которые могут в процессе микроплазменной и аргонодуговой на-

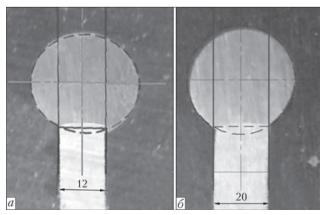


Рис. 1. Контур поперечного сечения валиков, наплавленных на узкую подложку различной ширины: a — эллипс; δ — окружность

© К.А. Ющенко, А.В. Яровицын, Г.Д. Хрущов, А.А. Фомакин, Ю.В. Олейник, 2015



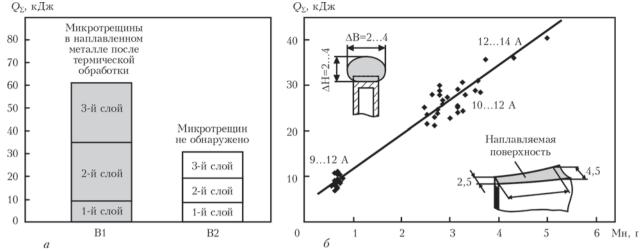


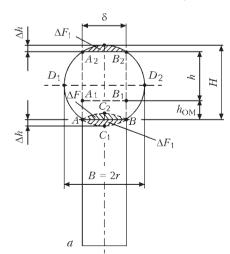
Рис. 2. Склонность к образованию микротрещин в наплавленном металле ЖС32 при 3-х слойной микроплазменной порошковой наплавке торца пера лопатки (a) и зависимость общих тепловложений в анод Q_{Σ} от массы $M_{\rm H}$ наплавляемого за один слой валика (b)

плавки удерживаться на рассматриваемой узкой подложке без применения формирующих приспособлений. Исходя из выше перечисленного, целью данной работы является:

- анализ закономерностей распределения наплавленного и основного металла в технологически вероятных поперечных сечениях валиков и формирование обобщенных критериев оптимальности их формы;
- вывод инженерных зависимостей для установления взаимосвязи между требуемой высотой наплавленного слоя, размерами валика, массой наплавленного металла и расходом присадки, необходимых для соответствующих ремонтно-восстановительных технологий.

Определения исходных геометрических показателей наплавленного на узкую подложку валика, необходимых для дальнейшего анализа его формы, приведены на рис. 3 и в табл. 1. Формулировки большинства из них авторы статьи постарались максимально приблизить к традиционно принятым для наплавленных на пластину валиков

- [12, 13]. Ряд новых определений эффективные высота валика h, поперечное сечение валика $F_{\rm E}$, поперечное сечение наплавленного металла в валике $F_{\rm HY}$ введены из-за необходимости рассмотрения размеров прямоугольника со сторонами δ и $(h+h_{\rm OM})$, вписанного в контур валика. При анализе поперечного сечения валика принимались следующие допущения (см. рис. 3):
- контур валика является частью окружности или эллипса;
- линия сплавления основного и наплавленного металла проходит по отрезку AB;
- площади соответствующего эллипса или окружности и контура поперечного сечения валика отличаются на величину сегмента ΔF_1 , которая равна площади верхнего усиления валика;
- расплавленный основной металл не выходит за пределы узкой подложки и локализуется в прямоугольнике со сторонами δ и $h_{\rm OM}$;
- после механической обработки наплавленный металл имеет прямоугольное сечение со сторонами δ и $h_{\rm OM} + h$.



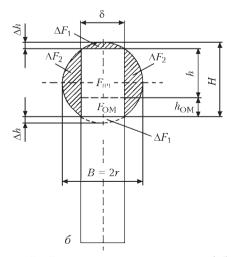


Рис. 3. Основные показатели поперечного сечения валика при однослойной наплавке на узкую подложку (обозначения см. в табл. 1). Заштрихованные части валика (δ) удаляются при механической обработке наплавленного металла



Т а б л и ц а 1. Основные геометрические показатели поперечного сечения валика, наплавленного на узкую подложку

№	Параметр	Обозначения согласно рис. 3					
1. Размеры							
1.1	Ширина узкой подложки	δ					
1.2	Ширина валика	В					
1.3	Высота валика	Н					
1.4	Глубина проплавления основного металла	$h_{ m OM}$					
1.5	Эффективная высота наплавленного металла	Н					
1.6	Эффективная высота валика	$h_{\mathrm{OM}} + h$					
1.7	Толщина бокового усиления валика	$\Delta p = 0.5(B - \delta)$					
1.8.	Высота верхнего усиления валика	$\Delta h = H - h - h_{\rm OM}$					
	2. Относительные размеры						
2.1	Относительная ширина валика	B/δ					
2.2	Относительная высота валика	H/δ					
2.3	Относительная глубина проплавления основного металла	$h_{\mathrm{OM}}/(h_{\mathrm{OM}}+h)$					
2.4	Относительная высота верхнего усиления валика	$\Delta h/(H+\Delta h)$					
3. Контур							
3.1	Геометрическая фигура, соответствующая контуру валика	Замкнутая кривая $AC_1BD_2CD_1$					
3.2	Периметр контура валика	Замкнутая кривая ABD_2CD_1					
4. Площадь поперечного сечения							
4.1	Площадь проплавленого основного металла	$F_{\rm OM} = h_{\rm OM} \cdot \delta$					
4.2	Эффективная площадь наплавленного металла в валике	$F_{\rm HY} = h\delta$					
4.3	Эффективное сечение валика	$F_{\rm E} = F_{\rm OM} + F_{\rm HY}$					
4.4	Площадь верхнего усиления валика	сегмент ΔF_1					
4.5	Площадь бокового усиления валика	сегмент ΔF_2					
4.6	Площадь наплавленного валика (ограниченная периметром контура валика)	$F_{\rm B} = F_{\rm E} + \Delta F_1 + 2\Delta F_2$					
4.7	Площадь, геометрической фигуры, соответствующей контуру валика	$F_{\Phi \text{KB}} = F_{\text{E}} + 2\Delta F_1 + 2\Delta F_2$					
5. Отношение площадей элементов в поперечном сечении валика							
5.1	Доля основного металла	$\gamma_{\rm OM} = F_{\rm OM}/F_{\rm B}$					
5.2	Относительная площадь эффективного сечения валика	$\gamma_{\rm E} = F_{\rm E}/F_{\rm B}$					
5.3	Относительная площадь эффективного сечения наплавленного металла	$\gamma_{\rm EH} = F_{\rm HY}/F_{\rm B}$					
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						

Форма валиков изучалась путем натурного моделирования технологически вероятных поперечных сечений при варьировании параметров δ , H, B и определения в программе системы автоматизированного проектирования технической документации Компас-3D V12 площадей ее составляющих (рис. 4). Рассматривались следующие наиболее

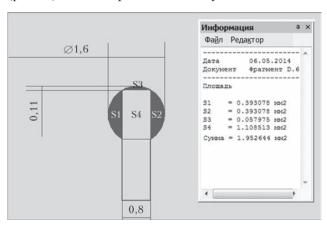


Рис. 4. Пример определения в системе автоматизированного проектирования Компас-3D V12 площади элементов поперечного сечения валика при их натурном моделировании

вероятные законы последовательного изменения геометрической фигуры, соответствующей контуру валика: окружность, ее диаметр увеличивается (рис. 5, a); эллипс, его горизонтальная ось расширяется до окружности (рис. 5, δ); эллипс, его вертикальная ось вытягивается до окружности (рис. 5, δ).

Первоначально натурное моделирование технологически вероятных форм поперечного сечения однослойного наплавленного металла выполнялось для узкой подложки $\delta = 0.8$; 1.5; 4.0 и 6.0 мм в диапазонах соотношений ширины и высоты валика: B = (1...10) δ и $H \leq 4\delta$. Количество проанализированных поперечных сечений составляло 40...50 шт. на каждый типоразмер ширины узкой подложки. Полученные массивы данных γ_E и B/δ оценивались на принадлежность к общей зависимости $\gamma_E = f(B/\delta; \gamma_{OM} = 0)$ как визуально, так и по статистическим критериям [14]: Пирсона (R), индекса детерминации (R^2) , Фишера (F). Затем выявленные геометрические закономерности формы

AUTOMATICAMOTE

 $^{^{1}}$ При разбиении $\gamma_{\rm E} = f(B/\delta)$ на ряд линейных участков.



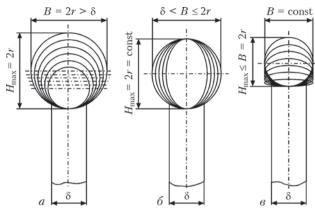


Рис. 5. Типовые изменения формы поперечного сечения валика при изменении параметров режима наплавки узкой полложки

валика выборочно проверялись для $\delta = 0.5$; 2,0; 3,0; 5,0; 8,0; 10,0 мм путем случайного выбора сочетания ширины и высоты валика в этом же диапазоне; количество проанализированных вероятных сечений валиков составляло 10...15 шт. на каждый дополнительный типоразмер ширины узкой подложки.

Совокупность зависимостей $\gamma_{\rm EH} = f(B/\delta; \gamma_{\rm OM})$, полученных в результате обработки данных натурного моделирования технологически вероятных поперечных сечений наплавленных валиков представлена на рис. 6. Случай $\gamma_{\rm EH} < 0$ соответствует занижению узкой подложки относительно ее первоначального уровня Z_1Z_2 , $\gamma_{\rm EH} > 0$ — наращиванию. Аппроксимация степенной функцией совокупности точек B/δ и $\gamma_{\rm OM}$ при которых $\gamma_{\rm EH}$ (B/δ ; $\gamma_{\rm OM}$) = 0 при $B/\delta > 1$,4, позволила связать условие наращивания узкой подложки с одним из важнейших показателей эффективности наплав-

ки — долей основного метала в наплавленном валике:

$$\gamma_{o} < \gamma_{E} = \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-0.866}.$$
 (1)

Таким образом, для повышения эффективности наращивания наплавляемой узкой подложки с увеличением относительной ширины валика требуется более жестко ограничивать в нем долю основного металла. Следует также отметить, что для $B/\delta=1,28$ наблюдается максимум значений $\gamma_E=0,714$ (см. зависимость № 1 на рис. 6), а относительная площадь верхнего и боковых усилений валиков при этом минимальна. С некоторым приближением соответствующими критерию максимума полезной площади поперечного сечения можно считать валики с $B/\delta=1,2...1,4$, для которых $\gamma_E>0,7$. Для $B/\delta=1,4...10,0$ величина γ_E в интервале значений 0,12...0,7 может быть уточнена при помощи зависимости (1).

Для анализа особенностей распределения металла между центральной частью и периферией валика необходимо предварительно уточнить долю основного металла. Содержание наплавленного $\gamma_{\rm EH}$ и основного $\gamma_{\rm OM}$ металла в центральной части валика:

$$\gamma_{\rm EH} = \gamma_{\rm E} - \gamma_{\rm OM},\tag{2}$$

$$\gamma_{\rm OM} = \frac{F_{\rm OM}}{F_{\rm B}} = \frac{h_{\rm OM}\delta}{F_{\rm B}},\tag{3}$$

где в поперечном сечении наплавленного валика: $h_{\rm OM},\ F_{\rm OM}$ — соответственно глубина и площадь проплавления основного металла; $F_{\rm B}$ — площадь валика. Величина $F_{\rm B}$ может быть рассчитана как:

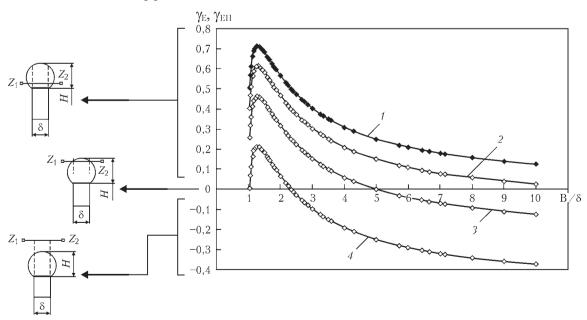


Рис. 6. Зависимость относительной площади эффективного сечения валика $\gamma_{\rm E}$ и относительной площади эффективного сечения наплавленного металла $\gamma_{\rm EH}$ от относительной ширины валика B/δ (по данным статистической обработки результатов натурного моделирования). Z_1Z_2 — уровень узкой подложки до наплавки валика; I — $\gamma_{\rm E}$ = $\gamma_{\rm EH}$ при $\gamma_{\rm OM}$ = 0,2 $\gamma_{\rm EH}$ при $\gamma_{\rm OM}$ = 0,2 $\gamma_{\rm EH}$ при $\gamma_{\rm OM}$ = 0,5



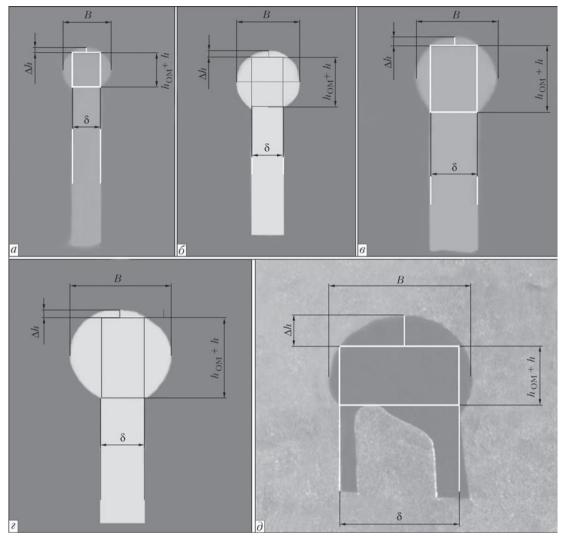


Рис. 7. Схема измерений размеров и внешний вид контуров поперечных сечений валиков, наплавленных на узкую подложку различной ширины (см. табл. 2)

 $F_{\rm B} = F_{\rm \Phi KB} - \Delta F_1 = 0.25\pi B (h_{\rm OM} + h) - \Delta F_1,$ (4) где $F_{\rm \Phi KB}$ — площадь, ограниченная фигурой контура поперечного сечения валика (эллипс или окружность); $\Delta h, \Delta F_1$ — соответственно, величина и площадь верхнего усиления валика. В свою очередь, величину площади сегмента окружности (или в общем случае — эллипса) ΔF_1 можно приближенно вычислить аналогично площади верхнего усиления стыкового сварного шва [13]:

$$\Delta F_1 = 0.73 \Delta h \delta. \tag{5}$$

Для выполнения расчетов по зависимостям (1)–(5) остается определить величину верхнего усиления наплавленного валика Δh , которая свя-

зывает требуемую высоту наплавленного слоя с необходимой высотой валика. Для фигуры в виде окружности, соответствующей контуру валика, можно использовать формулу расчета его стрелы сегмента [15], однако для фигуры в виде эллипса точный расчет Δh затруднителен.

Обработка статистических данных натурного моделирования показала, что наиболее рационально данный параметр выражается через относительную высоту верхнего усиления валика $\Delta h/(H+\Delta h)$. Указанная зависимость с высокой степенью достоверности аппроксимируется степенной функцией:

Т а б л и ц а $\,$ 2 . Сравнение расчетной и фактической величины верхнего усиления валика Δh , наплавленного на узкую подложку различной ширины

подгожку разли поп ширины										
	Рис. 7, а		Рис. 7, б		Рис. 7, в		Рис. 7, г		Рис. 7, ∂	
Параметр	$\Delta = 1,2 \text{ MM}$		$\Delta = 1.2 \text{ MM}$		$\Delta = 2.0 \text{ MM}$		$\Delta = 2.0 \text{ MM}$		Δ = 5,0 mm	
	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.
В, мм	_	2,00	_	2,40	_	3,32	_	4,52	_	6,00
Β/δ	1,67	_	2,00	_	1,66	_	2,26	_	1,20	_
$h_{\rm OM} + h$, MM	_	1,49	_	1,95	_	2,66	_	3,57	_	2,77
Δh , mm	0,20	0,23	0,16	0,20	0,36	0,43	0,30	0,22	1,06	1,20

$$\frac{\Delta h}{H + \Delta h} = 0.3215 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2.161}.\tag{6}$$

Принимая во внимание, что высота валика $H = h_{\rm OM} + h + \Delta h$, после ряда преобразований получим следующее выражение для верхнего усиления наплавленного валика:

$$\Delta h = \frac{0.3215 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2.161} \cdot (h_{\text{OM}} + h)}{1 - 0.6430 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2.161}}.$$
 (7)

Данные численного моделирования по зависимости (7) свидетельствуют, что при $B/\delta > 2$ величина верхнего усиления валика не превышает 1 мм. В случае сочетания $B/\delta < 2$ и эффективной высоты валика $h_{\rm OM} + h > 3...5$ мм величина Δh может составлять несколько мм, что необходимо учитывать при выборе размеров наплавляемого валика. Установлено (см. рис. 7, табл. 2), что для высоты верхнего усиления валика Δh достигается приемлемый уровень сходимости расчетных (7) и экспериментальных данных.

После подстановки в зависимость (3) выражений (4), (5), (7) и некоторых преобразований получим следующее выражение доли основного металла $\gamma_{\rm OM}$ через относительную глубину проплавления основного металла $h_{\rm OM}/(h_{\rm OM}+h)$ и относительную ширину валика B/δ :

$$\gamma_{\rm OM} = \frac{h_{\rm OM}}{h_{\rm OM} + h} \cdot \frac{\left[1 - 0,6430 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161}\right]}{0,25\pi \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161} - 0,2347 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161}} \cdot (8)$$

Построив на одном графике зависимости (1), (2), (8), оценим баланс распределения металла между эффективным сечением валика и его усилениями при относительной ширине валика более

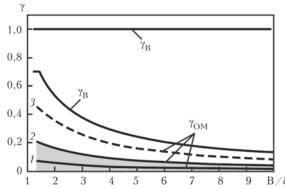


Рис. 8. Баланс распределения металла в наплавленном валике в зависимости от относительной ширины валика B/δ : Обозначения: $\gamma_{\rm B}$ — весь металл; $\gamma_{\rm E}$ — доля металла в эффективном сечении валика; $\gamma_{\rm OM}$ — доля основного металла, соответствующая значениям относительной глубины проплавления: I — $h_{\rm OM}/(h+h_{\rm OM})=0,1; 2$ — $h_{\rm OM}/(h+h_{\rm OM})=0,33; 3$ — $h_{\rm OM}/(h+h_{\rm OM})=0,66$. Область заливки соответствует оптимальным режимам наплавки

1,4 (рис. 8). Данные численного моделирования показывают, что в области оптимальных режимов наплавки $(h_{\rm OM}/(h_{\rm OM}+h)=0,1...0,3)$ содержание основного металла в валике может составлять 2...22 %. Эффективность заполнения наплавленным металлом центральной части валика последовательно снижается за счет увеличения площади боковых припусков при возрастании соотношения B/δ .

В виду того, что доля основного металла в наплавленном валике ограничена, целесообразно уточнить представления и о закономерностях расхода присадочных материалов в процессе наплавки узкой подложки. Они определяются прямыми и непрямыми потерями присадки.

Первый вид потерь преимущественно обусловлен распределенным вводом дисперсной присадки в сварочную ванну [3, 16]. Второй вид — «перераспределением» наплавленного металла из прямоугольника со сторонами δ и $(h+h_{\rm OM})$ в область верхнего и боковых усилений (см. рис. 1, 3). Ограничение площади поперечных сечений ΔF_1 и ΔF_2 в наплавленном валике является одной из важных технологических задач для такого вида наплавки ввиду целесообразности снижения затрат тепла дуги и дорогостоящей присадки на наплавку «лишнего» объема валика, впоследствии удаляемого механической обработкой.

Производственная практика показала, что оптимальной трудоемкости последующей обработки валика отвечает диапазон толщин бокового усиления валика $\Delta p = 0,5...1,25$ мм. Проверка соответствия критериев оптимального эффективного сечения и оптимальной трудоемкости обработки, наплавленных на узкую подложку $\delta = 0,5...10,0$ мм, представлена в виде численного (табл. 3) решения системы уравнений:

$$\frac{B}{\delta} = \frac{\delta + 2\Delta p}{\delta};\tag{9}$$

$$1,2 \le B/\delta \le 1,4. \tag{10}$$

Известно, что массу наплавленного металла $M_{\rm H}$ можно определить исходя из площади поперечного сечения наплавленного металла $F_{\rm H}$, длины валика L и плотности материала $\rho_{\rm M}$:

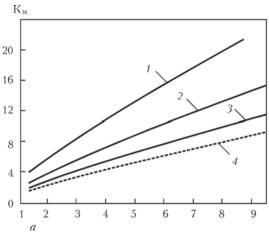
$$M_{\rm H} = F_{\rm H} L \rho_{\rm M}. \tag{11}$$

Таблица 3. Изменение относительной ширины валика B/δ в зависимости от ширины узкой подложки δ при толщине бокового усиления валика $\Delta p=0,5...1,25$ мм

δ, мм	Β/δ	δ, мм	Β/δ
0,5	3,006,00	5,0	1,201,50
1,0	2,003,50	6,0	1,171,42
1,5	1,672,67	7,0	1,141,35
2,0	1,502,25	8,0	1,131,31
2,5	1,402,00	9,0	1,111,28
3,5	1,281,71	10,0	1,101,25

ACCOMATECERAS

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



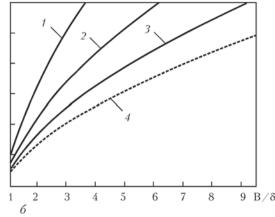


Рис. 9. Численное моделирование коэффициента удельного расхода $K_{\rm M}$ присадки в зависимости от относительной ширины валика B/δ и относительной глубины проплавления: $a - h_{\rm OM}/(h + h_{\rm OM}) = 0.25; \delta - h_{\rm OM}/(h + h_{\rm OM}) = 0.66$. Значения КИП: I - 0.4; 2 - 0.6; 3 - 0.8; 4 - 1.0

$$F_{\rm H} = F_{\rm B} - F_{\rm OM} = F_{\rm B} - h_{\rm OM} \delta.$$
 (12)

В свою очередь, площадь $F_{\rm B}$ можно выразить через относительную площадь эффективного сечения валика $\gamma_{\rm E}$.

$$F_{\rm B} = \frac{F_{\rm E}}{\gamma_{\rm E}} = \frac{(h_{\rm OM} + h)\delta}{\gamma_{\rm E}}.$$
 (13)

С учетом (1) после некоторых преобразований получим:

$$F_{\rm B} = (h_{\rm OM} + h)\delta(B/\delta)^{0.866}$$
. (14)

Зависимости (11)—(14) позволяют оценить для узкой подложки необходимую массу наплавленного металла в зависимости от требуемой эффективной высоты наплавленного металла h. Динамику изменения затрат присадочного материала при ее восстановлении рационально продемонстрировать через коэффициент удельного расхода $K_{\rm M}$, рассчитанный с учетом зависимостей (2), (8) и характеризующий увеличение общего количества присадки по сравнению с затраченной на заполнение центральной части валика:

$$K_{\rm M} = \text{KU}\Pi^{-1} \cdot (\gamma_{\rm EH})^{-1}; \tag{17}$$

$$M_N = K_M M_0 N, \tag{18}$$

где КИП — коэффициент использования присадки; M_0 — ее затраты на прямоугольник со сторонами δ и h в одном изделии; N — количество восстанавливаемых наплавкой изделий. Результаты численного моделирования величины $K_{\rm M}$ (рис. 9, табл. 3) показывают существенную зависимость расхода присадки от ширины узкой подложки, коэффициента использования присадки, относительной ширины валика, относительной ширины валика, относительной пирины валика, относительной пирины валика, относительной пирины основного металла. Рис. 9 также демонстрирует целесообразность разработки и реализации дополнительного блока технологических мероприятий, направленных на повышение эффективности использования дисперсной присадки (для микроплазменной порошковой наплавки).

Таким образом, установлено, что обобщенным геометрическим критерием формы рассматриваемых валиков является их относительная ширина. При ее значении 1,2...1,4 достигается максимальное соотношение площадей центральной части и общей площади поперечного сечения валика – примерно 0,7. Условие наращивания узкой подложки в процессе однослойной наплавки связано с ограничением доли основного металла в валике $\gamma_{\rm OM} < \gamma_{\rm E} = ({\rm B}/\delta)^{-0.866}$. Для оптимальных режимов наплавки доля основного металла в зависимости от относительной ширины валика должна составлять 3...22 % полного объема валика. Возможность сочетания критериев оптимальной формы валика и оптимального припуска на механическую обработку 0,5...1,25 мм зависит от ширины узкой подложки и может быть: полное — для δ = = 5,0...7,0 мм; частичное — для $2,5 \le \delta < 5,0$ мм. Для узкой подложки $\delta < 2.5$ мм при указанных припусках на механическую обработку возможно лишь последовательное приближение к оптимальному распределению металла между центральной частью валика и его усилениями.

Полученные данные по закономерностям формообразования поперечного сечения наплавленного металла и требуемому расходу присадки также свидетельствуют, что оптимизация ширины наплавляемого на узкую подложку валика позволит на 10...40 % снизить количество «лишнего» наплавленного металла и, соответственно, уменьшить количество нерационально введенного в анод тепла. Это будет как благоприятно сказываться на свариваемости никелевых жаропрочных сплавов при наплавке (особенно многослойной) на узкую подложку, так и позволит существенно ограничивать расход присадочных материалов и трудоемкость данной ремонтно-восстановительной технологии.





Выводы

Выполнен анализ геометрических закономерностей формирования однослойного валика на узкой подложке шириной $\delta=0,5...5$ мм и уточнены задачи для технологического управления его формой в процессе наплавки в части, касающейся эффективного наращивания узкой подложки, оптимальной полезной площади поперечного сечения валика и приемлемых боковых припусков на механическую обработку.

Предложены формулы для оценочных инженерных расчетов, устанавливающие взаимосвязь между требуемой высотой наплавленного слоя, размерами валика, массой наплавленного металла и расходом присадки при наплавке узкой подложки. Они могут быть использованы при разработке ремонтно-восстановительных технологий для деталей авиационных газотурбинных двигателей.

- Перемиловский И.А., Гейченко В.С., Фрумин И.И. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей // Автомат. сварка. 1976. № 5. С. 54–56.
- 2. *Аржакин А.Н., Столяров И.И., Туров А.В.* Разработка технологии восстановления рабочих лопаток 8 ступени КВД авиационного двигателя методом автоматической наплавки// Сварщик. 2003. № 4. С. 8–9.
- 3. *Особенности* малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку/ А.В. Яровицын, К.А. Ющенко, А.А. Наконечный, И.А. Петрик // Автомат. сварка. 2009. № 6. С. 37–42.
- Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Там же. – 2010. – № 1. – С. 59–62.
- Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигате-

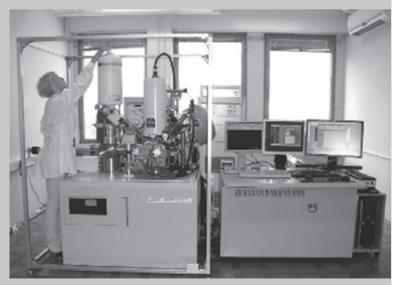
- ля Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, А.В. Яровицын и др. // Автомат. сварка. — 2010. — № 8. — C. 25—29.
- 6. Сом А.И., Гладкий П.В. Особенности плазменной наплавки на узкую подложку / Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны // Под ред. И.И. Фрумина. Киев: Наук. думка, 1984. С. 20–24.
- 7. Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. Киев: Экотехнология, 2007. 292 с.
- 8. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Свароч. пр-во. 1997. N 4. C. 4–11.
- Сорокин Л.И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов// Там же. – 1999. – № 12. – С. 11–17.
- Яровицын А.В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки // Автомат. сварка. 2015. № 5-6. С. 18–25.
- 11. *О смещении* наплавочного валика при ремонте лабиринтных уплотнений способом наплавки в защитных газах неплавящимся электродом / В.А. Гейкин, Г.В. Мартышин, Н.И. Шаронова, В.С. Фролов // Свароч. пр-во. 2011. № 3. С. 27–30.
- Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов [с основами физической химии]. – М.: Высшая школа, 1967 – 508 с
- 13. *Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демьянцевич В.П.* Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
- 14. *Розанов Ю.А.* Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика: Учебник для студентов вузов. 2-е изд. доп. М.: Наука, 1989. 312 с.
- Бронитейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике: для инженеров и учащихся втузов. 11-е изд. М.:Наука, 1967. 608 с., С. 169.
- 16. *Некоторые* пути снижения потерь присадочного порошка при микроплазменной порошковой наплавке / К.А. Ющенко, А.В. Яровицын, Д.Б. Яковчук и др. // Автомат. сварка. 2013. № 9. С. 32–38.

Поступила в редакцию 16.04.2015

ЦЕНТР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Центр оснащен уникальным комплексом аналитического и исследовательского оборудования ведущих фирм Японии, США, Западной Европы и является единственным в Украине.

В центре работают высококвалифицированные специалисты (9 докторов и 16 кандидатов наук), многие из которых прошли стажировку в научно-исследовательских центрах ведущих европейских стран и США. В центре занимаются аналитическими, материаловедческими, физико-химическими исследованиями пирометаллургических процессов, а также фундаментальными исследованиями физических и металлургических процессов сварки и родственных технологий, выяснением причин и механизмов разрушения конструкций и сварных соединений.



Оже-микрозонд с полевым эмиссионным катодом JAMP-9500F (JEOL Ltd, Япония), укомплектованный энергодисперсионным спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350 для анализа элементов от бериллия до урана.



УДК 621.791.927

ОЦЕНКА ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ НАПЛАВКЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В.Н. МАТВИЕНКО, В.А. МАЗУР, Л.К. ЛЕЩИНСКИЙ

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500 Украина, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: matvivenkovn@mail.ru

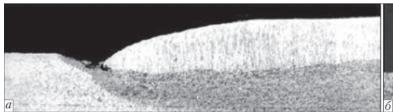
Представлены результаты расчетной оценки формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом под флюсом. Использовалась математическая модель, основанная на решении нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности с учетом зависимости от температуры теплофизических свойств основного металла. Расчетные зависимости, описывающие процесс распространения тепла в основном металле при наплавке комбинированным ленточным электродом, получены из условий аддитивного действия трех источников — средней и двух боковых лент. С увеличением тепловложения на краях изменяется не только форма и размеры ванны, но также возрастает неравномерность проплавления. Показано, что за счет изменения угла поворота боковых лент относительно средней ленты комбинированного электрода можно воздействовать на формообразование сварочной ванны и глубину проплавления. Адекватность разработанной модели подтверждена хорошим совпадением расчетных данных с экспериментом. Библиогр. 10, рис. 9.

Ключевые слова: распространение тепла, расчет температуры нагрева, форма сварочной ванны, математическая модель, наплавка под флюсом, комбинированный ленточный электрод, угол поворота боковых лент, тепловложение на краях ванны, неравномерность проплавления.

Процесс широкослойной наплавки ленточным электродом отличается меньшим проплавлением изделия и снижением доли участия материала изделия в наплавляемом слое [1]. Характерный для этого процесса рассредоточенный ввод тепла по фронту плавления основного металла [2], а также увеличенный теплоотвод на краях сварочной ванны способствуют образованию дефектов - краевых непроваров, подрезов, шлаковых включений (рис. 1). На их возникновение большое влияние оказывает отток расплавленного металла от боковых границ сварочной ванны с формированием осевого потока, направленного в хвостовую часть ванны. Это подтверждается значительной выпуклостью средней части задней стенки кратера, образуемого при наплавке ленточным электродом (рис. 2).

Для устранения краевых дефектов необходимо перераспределить тепломассоперенос по ширине ванны, изменить направление потоков жидкого

металла, улучшив заполнение жидким металлом боковых участков ванны. С целью достижения таких изменений используется воздействие на расплав ванны магнитного поля [3], в результате чего образуются потоки, направленные от середины к краям ванны и далее вдоль краев в хвостовую часть. При этом изменяется форма сварочной ванны, а на задней стенке кратера образуются две выпуклости. Аналогичное влияние на форму ванны оказывает применение профилированного по всей ширине ленточного электрода, позволяющего улучшить качество формирования валика, снизить вероятность появления краевых дефектов [4]. Намного большими возможностями влияния на образование сварочной ванны и условия формирования широкого валика отличается процесс наплавки комбинированным ленточным электродом, применение которого обеспечивает строго ограниченное равномерное проплавление основного металла, отсутствие дефектов в зоне сплавления [5].



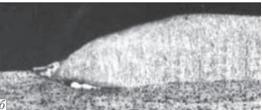


Рис. 1. Дефекты формирования валика при наплавке ленточным электродом: a — подрез; δ — краевой непровар и шлаковое включение

© В.Н. Матвиенко, В.А. Мазур, Л.К. Лещинский, 2015



Рис. 2. Форма сварочной ванны при наплавке ленточным электродом $50\times0,5$ мм

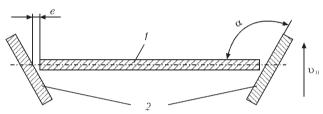


Рис. 3. Конструкция комбинированного ленточного электрода: 1 — средняя лента; 2 — боковые ленты

Конструкция комбинированного ленточного электрода (рис. 3) характеризуется размерами средней и боковых лент, скоростью подачи каждой ленты, углом поворота а боковых лент относительно средней, зазором е между лентами. От этих характеристик комбинированного электрода зависят условия плавления основного металла, формообразование сварочной ванны, неравномерность проплавления. Экспериментальное изучение этих процессов достаточно затруднено. В то же время численное моделирование процесса распространения тепла при сварке плавлением (наплавке) позволяет не только снизить трудоемкость проводимых исследований, но получить новые данные, прогнозировать форму и размеры ванны, состав, структуру и свойства металла шва (наплавленного слоя) [6, 7]. Поэтому в настоящей работе для исследования формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом применялся метод математического моделирования в сочетании с проведением экспериментов.

Математическое моделирование процесса нагрева и плавления основного металла. Распространение тепла при наплавке ленточным электродом под флюсом описывается уравнением предельного состояния процесса нагрева полубесконечного тела линейным источником конечной ширины. Расчетные значения размеров зоны проплавления, полученные при решении линейного дифференциального уравнения теплопроводности для теплопроводящего твердого тела с независя-

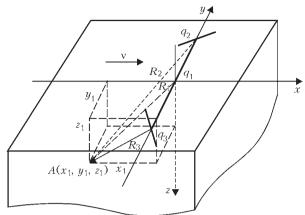


Рис. 4. Расчетная схема нагрева тела тремя лентами комбинированного электрода

щими от температуры теплофизическими свойствами, значительно расходятся с экспериментом [2, 8]. Точность расчетов значительно повышается, если учитывается зависимость теплофизических свойств металла от температуры, что требует решения нелинейного трехмерного дифференциального уравнения теплопроводности. Численное решение уравнения с использованием метода конечных элементов положено в основу разработанной математической модели [9]. При этом учитывалось, что до наплавки температура всех точек тела одинакова и равна температуре окружающей среды, во время наплавки мощность теплового источника полностью расходуется на нагрев тела, а тепловой поток на его границах равен нулю. Применение при моделировании программного обеспечения MSC.Patran-Nastran позволило не только получать текущие значения температуры, но также количественные характеристики теплового поля в зоне нагрева и плавления основного металла.

Нагрев основного металла линейным источником тепла [2] в процессе наплавки комбинированным ленточным электродом определяется суммарным действием трех источников — среднего q_1 и двух боковых q_2 и q_3 (рис. 4). Температура нагрева металла от воздействия каждой из лент комбинированного электрода рассчитывается из зависимости для источника тепла постоянной мощности, движущегося по поверхности полубесконечного тела:

$$T_{i}(x, y, z) - T_{0} = \frac{q}{2\pi B(b)} \int_{0}^{y_{i}} \left(\frac{1}{R_{i}}\right)^{\frac{\upsilon}{2a}(x_{i} - R_{i})}$$

где
$$R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$$
 .

Расчеты при моделировании и эксперименты проводили для процесса наплавки на пластины из стали Ст3 толщиной 40 мм комбинированным электродом из лент Св-07X25H13 (средняя лента $75\times0,5$ мм, боковые ленты $25\times0,7$ мм), угол пово-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

рота боковых лент к средней $\alpha=90^{\circ}...150^{\circ}$, зазор между лентами $e=0^{+5}$ мм. Параметры режима наплавки под флюсом ОФ-10: $I_{\rm H}=1300...1350$ A; $U_{\rm H}=30...32$ B; $v_{\rm H}=14$ м/ч.

Моделирование теплового поля наплавляемого изделия. Для оценки формы и размеров сварочной ванны исследовали модели теплового поля и положения изотермы $T_{\rm пл}$ в плоскости, параллельной наплавляемой поверхности (рис. 5, 6). При этом учитывалось, что плавление металла и образование ванны во многом зависит от угла поворота боковых лент относительно средней ленты комбинированного электрода. По данным предварительных экспериментов уменьшение угла поворота $\alpha < 90^{\circ}$ приводит к ухудшению качества формирования наплавленного валика и возрастанию неравномерности проплавления. Поэтому в данной работе рассматривали результаты компьютерного моделирования теплового поля для значений угла поворота $\alpha > 90^{\circ}$. С увеличением угла α от 90 до 150° (рис. 6) изменяется степень рассредоточенности вводимого тепла и переноса электродного металла в сварочную ванну. Это влияет на положение границы изотермы T_{nn} , полученной при моделировании, позволяя оценить не только изменение формы ванны, но также длины участков $B_{\scriptscriptstyle \Pi\Pi}$ изотермы плавления, ориентированных вдоль продольной оси ванны. От этого зависит заполнение и время существования расплава на краю ванны. Кроме того, от геометрии комбинированного электрода зависит угол у, характеризующий отклонение изотермы $T_{\Pi\Pi}$ от участков, ориентированных вдоль продольной оси ванны, и определяющий уменьшение ширины хвостовой части ванны относительно ширины фронта плавления (рис. 6). Адекватность результатов моделирования формы и размеров сварочной ванны подтверждается экспериментальными данными (рис. 7).

Рассматриваемое на модели влияние геометрии комбинированного ленточного электрода на форму и размеры сварочной ванны, позволяющее улучшить формирование валика, сочеталось с необходимостью обеспечить надежное равномерное проплавление основного металла. Исходя из этого, выбор при моделировании оптимальных значений угла поворота боковых лент комбинированного электрода осуществлялся с учетом ограничения глубины проплавления на краях. Максимум сосредоточенности тепломассопереноса на краях ванны возникает, когда угол поворота боковых лент $\alpha = 90^{\circ}$, что сопровождается увеличением глубины проплавления в этих зонах (рис. $8, \varepsilon$).

Как видно из положения границы изотермы $T_{\rm пл}$, основную часть площади проплавления составляют участки, удаленные от середины ванны. С увеличением угла α до 150° рассредоточенность

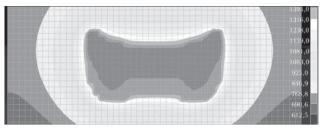


Рис. 5. Модель теплового поля наплавляемой поверхности тела для угла наклона боковых лент $\alpha = 120^\circ$

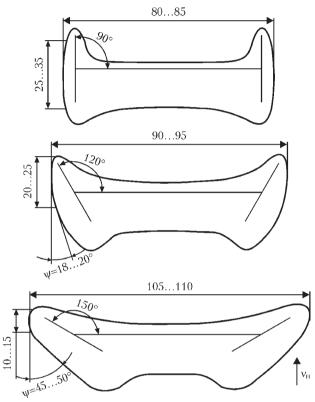


Рис. 6. Моделирование формы и размеров сварочной ванны (границ изотермы T_{nn})



Рис. 7. Форма сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом (угол $\alpha=120^\circ$)

теплового потока приводит к значительному увеличению ширины ванны, неравномерность проплавления снижается (рис. 9, z). Оптимальное сочетание высокого качества формирования валика и равномерности проплавления достигается, когда $\alpha=120^\circ$, что выявлено при моделировании теплового поля и границы изотермы $T_{\rm пл}$ (рис. 8, a, δ), а также подтверждается макроструктурой поперечного сечения наплавленного валика (рис. 9).



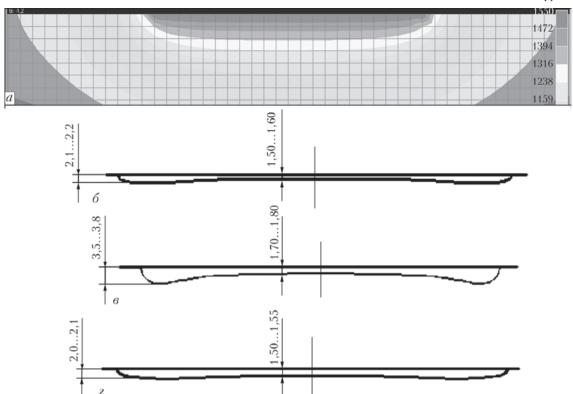


Рис. 8. Модель теплового поля (*a*) и границы изотермы $T_{\text{пл}}$ (δ – ϵ) в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности: $\alpha = 120^{\circ}$ (*a*, δ); 90° (ϵ); 150° (ϵ)



Рис. 9. Макрошлиф поперечного сечения наплавленного валика ($\alpha = 120^{\circ}$)

В заключение можно отметить, что точность расчетных значений температуры нагрева основного металла и расположения границы изотермы плавления, определяющей форму и размеры сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным элктродом [10], значительно возрастает в случае использования в расчете зависящих от температуры теплофизических характеристик металла. Это подтверждается соответствием данных, полученных при математическом моделировании, результатам эксперимента.

 Рябцев И.А. Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами // Автомат. сварка. – 2005. – № 6. – С. 36–41.

- 2. *Махненко В.И., Кравцов Т.Г.* Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров. Киев: Наук. думка, 1976. 159 с.
- 3. *Pat.* 4309587, *B23K* 9/04 *USA*. Horizontal electro-slag welding process for surfacing / S. Nakano, T. Chiba, N. Ichihara, K. Agusa et al. 1982.
- Лещинский Л.К., Матвиенко В.Н., Лаврик В.П. Влияние формы электродной ленты на качество наплавленного слоя стали // Автомат. сварка. – 1985. – № 9. – С. 60–62.
- 5. *А.с. 1561348 СССР, МКИ В23К 9/04*. Способ наплавки расщепленным ленточным электродом / В.Н. Матвиенко, Л.К. Лещинский, В.А. Егоров и др. –Заявл. 28.09.88; Опубл. 03.01.90, Бюл. № 16.
- 6. *ASM Handbook*. Welding Fundamentals and Processes. ASM International, 2011. Vol. 6A. 700 p.
- 7. *Моделирование* тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием / А.Л. Майстренко, В.М. Нестеренков, В.А. Дутка, В.А. Лукаш и др. // Автомат. сварка. 2015. № 1. С. 5–14.
- Белоусов Ю.В., Лещинский Л.К., Сологуб Б.Б. Выбор оптимальной формы ленточного электрода для широкослойной наплавки // Там же. – 1976. – № 12. – С. 24–28.
- Математическое описание процесса распространения тепла в инструменте сложной формы от действия плазменного источника нагрева / С.С. Самотугин, О.Ю. Нестеров, В.А. Мазур, В.В. Ананьева // Вест. Инженерной акад. наук Украины, 2004. – С. 101–107.
- Матвиенко В.Н., Лещинский Л.К., Мазур В.А. Нагрев и плавление основного металла при наплавке составным ленточным электродом под флюсом // Свароч. пр-во. – 2014. – № 4. – С. 3–7.

Поступила в редакцию 22.06.2015



УДК 6217.791.927.5

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

И.А. РЯБЦЕВ, Ю.Н. ЛАНКИН, В.Г. СОЛОВЬЕВ, П.П. ОСЕЧКОВ, В.А. ТИЩЕНКО, А.Г. ТИХОМИРОВ ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail:office@paton.kiev.ua

На базе портативного компьютера и современного программного обеспечения разработана информационно-измерительная система, которая предназначена для исследования особенностей и последующей автоматизации процессов дуговой наплавки. На наплавочной установке, оснащенной разработанной компьютерной информационно-измерительной системой (КИИС), можно с высокой степенью точности и достоверности выполнять экспериментальные исследования влияния способа наплавки, диаметра или сечения используемого электродного материала на его сварочно-технологические характеристики и качество формирования наплавленных валиков и слоев. КИИС по мере накопления баз данных по технологиям дуговой наплавки различных деталей может послужить основой для создания систем автоматического управления процессами дуговой наплавки. Библиогр. 3, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: дуговая наплавка, автоматизация дуговой наплавки, порошковые проволоки, режимы наплавки, технологии наплавки

Дуговая наплавка, в силу своей универсальности, применяется для восстановления и упрочнения деталей различной конфигурации, размеров и массы. При этом при наплавке деталей (листов), имеющих небольшую толщину (менее 5 мм), из-за опасности прожогов необходимо использовать электродные проволоки малых диаметров, высокую скорость наплавки и минимально возможные показатели режима наплавки по току и напряжению. Однако это может понизить стабильность и производительность процесса наплавки, ухудшить формирование наплавленных валиков. В то же время если опасности прожогов нет, то для повышения производительности используются максимальные режимы наплавки. В результате увеличивается проплавление основного металла и его доля в наплавленном металле, что зачастую приводит к необходимости выполнения многослойной наплавки.

На практике на производстве решение задачи разработки технологии и техники наплавки конкретной детали зависит от опыта технолога-наплавщика, что не всегда приводит к оптимальному результату. Чтобы избежать возможных ошибок при разработке технологий наплавки, необходима более высокая степень автоматизации и компьютеризации разработки и управления процессами дуговой наплавки.

Разработка систем автоматического управления процессами дуговой наплавки различных деталей требует учета многих параметров. Она должна обеспечивать возможность выбора типа электродного материала (сплошная или порошковая проволока; холоднокатаная или порошковая лента) и его раз-

меров (диаметр, сечение); способа наплавки (под флюсом, открытой дугой или в защитных газах); задания и поддержания заданных режимов и техники наплавки; отметки случайных или преднамеренных отклонений от заданных режимов наплавки; запоминания и последующего использования оптимальных режимов наплавки конкретных деталей. Имеющийся опыт [1–3] показывает, что современный уровень развития компьютерной техники позволяет решить эту проблему.

Если не усложнять проблему разработки систем автоматического управления процессами дуговой наплавки выбором химического состава наплавленного металла, который производится, исходя из условий эксплуатации конкретной наплавляемой детали, то примерный перечень данных, необходимых для разработки таких систем, выглядит следующим образом: напряжение наплавки $U_{\mu}(t)$; ток наплавки $I_{\mu}(t)$; диаметр (сечение) электродного материала; скорость подачи электродного материала; скорость наплавки; погонная энергия наплавки; вылет электродной проволоки (ленты); геометрические размеры наплавляемых валиков и перекрытие соседних наплавленных валиков; геометрические размеры наплавляемой детали, образца; марка электродной проволоки (ленты); марка основного металла; необходимость использования защитного газа и его состав; необходимость использования флюса и его марка; необходимость использования предварительного подогрева и посленаплавочной термообработки; комплексный показатель качества наплавки, учитывающий геометрические размеры и формиро-

© И.А. Рябцев, Ю.Н. Ланкин, В.Г. Соловьев, П.П. Осечков, В.А. Тищенко, А.Г. Тихомиров, 2015

вание наплавленного металла, долю основного металла в наплавленном металле, производительность наплавки, характер переноса расплавленного электродного металла и стабильность протекания процесса и др.

Существующие универсальные наплавочные установки типа УМН-4, УМН-10, У-653 и др., а также наплавочные аппараты (установки) типа АД-231, А-1406, А-1412 обычно комплектуются источниками питания типа ВДУ-506, ВДУ-1201 или ВДУ-1202, которые рассчитаны на токи наплавки до 500 и 1200 А, соответственно. На этом оборудовании настройка режима наплавки по напряжению производится с помощью потенциометров в схеме управления источника питания и установки, а по току с помощью потенциометра, регулирующего скорость подачи электродной проволоки в схеме управления наплавочной установки. Учитывая это обстоятельство, настройку необходимых режимов наплавки по току и напряжению выполняют, изменяя положение потенциометра регулирования напряжения P_{μ} и положение потенциометра регулирования скорости подачи проволоки P_{vn} во время наплавки контрольных

Для автоматического определения положения потенциометров (P_u и P_{vp}) в соответствии с заданными усредненными значениями тока наплавки $\overline{U}_{\rm H}$ и напряжения наплавки $\overline{U}_{\rm H}$ требуется определить математические зависимости $P=F_u[\overline{U}_{\rm H},\overline{I}_{\rm H}]$ и $P_{vp}=F_v[\overline{U}_{\rm H},\overline{I}_{\rm H}]$. Функции F_u и F_{vp} относятся к конкретному источнику тока и к конкретной установке, а также к конкретной настройке способа и режима наплавки. Для получения этих функций необходимо собрать экспериментальную базу данных для каждого из способов, видов и режимов наплавки, для которых предназначена установка.

Для получения этих зависимостей и наполнения компьютерной базы данных по режимам наплавки была проведена серия экспериментов по наплавке порошковыми проволоками открытой дугой, под флюсом и в защитных газах. Эксперименты выполняли на универсальной наплавочной установке У-653, укомплектованной выпрямителем ВДУ 506. На ней можно выполнять наплавку плоских деталей и деталей типа тел вращения.

Регистрацию тока и напряжения наплавки в этих экспериментах проводили с помощью разработанной компьютерной информационно-измерительной системы (КИИС). Оцифровка и ввод данных первичных преобразователей в компьютер осуществлялись с помощью измерительного преобразователя напряжения E14-140 фирмы «Л-Кард» со встроенным 14-разрядным АЦП. Регистрация параметров осуществлялась с частотой 1 кГц. Обработку входных данных выполняли с помощью специально разработанного программного обеспечения в среде Міcrosoft Visual Studio 2010. Для анализа выходных данных системы использовали стандартные ПО, такие как PowerGraph, MATLAB и др. По введенным в компьютер данным автоматически идентифицируется текущее состояние исследуемого процесса (зажигание дуги, обрывы дуги, короткие замыкания дугового промежутка, периоды горения дуги) и рассчитываются параметры тока и напряжения для соответствующего процесса наплавки.

В целом КИИС обеспечивает контроль и регистрацию следующих параметров процесса наплавки: текущие значения напряжения наплавки $U_{\rm H}(t)$; текущие значения тока наплавки $I_{\rm H}(t)$; текущие значения дуги $U_{\rm H}(t)$ и тока дуги $I_{\rm H}(t)$, при этом $U_{\rm H}(t)$ и $I_{\rm H}(t)$ определяли путем исключения из $U_{\rm H}(t)$ и $I_{\rm H}(t)$ значений напряжения и тока в промежутки времени появления коротких замыканий и обрывов дуги; средние за время наплавки

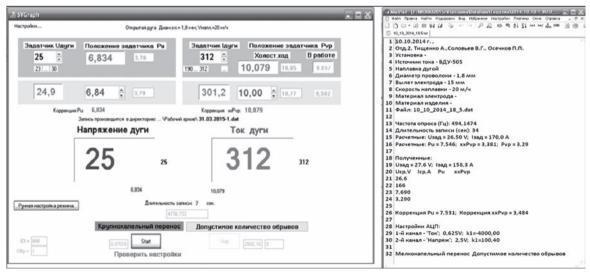


Рис. 1. Основной интерфейс системы для ввода, контроля и записи параметров наплавки (a) и протокол записи результатов эксперимента по наплавке (δ)



Результаты экспериментов по наплавке открытой дугой самозащитной порошковой проволокой ПП-Hп-25X5ФМС диаметром 1,8 мм, показывающие зависимости между положением потенциометров регулятора напряжения $P_{\mathbf{u}}$ и регулятора скорости подачи проволоки $P_{\mathbf{v}\mathbf{n}}$ и средними значениями напряжения \overline{U}_{π}^* и тока \overline{I}_{π}^* , записанными системой

Номер эксперимента	$\overline{U}_{\mathtt{A},\mathrm{B}}$	$\overline{I}_{A,A}$	P_u	P_{vp}	Номер эксперимента	$\overline{U}_{A,B}$	$\overline{I}_{A,A}$	$P_{\rm u}$	P_{vp}
1	27,6	179	7,69	3,29	14	23,8	193	6,42	5,01
2	25,6	182	7,26	3,49	15	23,4	177	6,01	5,52
3	26,5	206	7,54	3,38	16	26,5	251	7,77	5,49
4	27,6	177	7,69	3,41	17	25,7	144	7,01	3,00
5	25,2	233	7,41	4,27	18	23,4	156	5,61	5,03
6	25,8	210	7,41	4,27	19	23,7	158	6,32	3,74
7	27,8	211	7,91	4,23	20	25,0	160	6,95	3,74
8	25,9	285	7,77	5,81	21	26,1	214	7,51	4,51
9	22,7	265	6,92	6,14	22	23,9	174	6,33	3,90
10	24,0	240	7,00	4,76	23	28,8	217	8,16	4,39
11	23,1	197	6,44	4,76	24	23,7	200	6,82	5,16
12	24,9	256	7,41	5,49	25	22,8	219	6,33	5,61
13	24,0	176	6,42	4,53	26	24,0	285	7,32	5,61
$ *\overline{U}_{\mathrm{A}},\overline{I}_{\mathrm{A}}=\mathrm{yc}$	$*$ $\overline{U}_{\rm J}$, $\overline{I}_{\rm J}$ — усредненные за время наплавки напряжение дуги $U_{\rm J}(t)$ и ток дуги $I_{\rm J}(t)$, соответственно.								

напряжение дуги $\overline{U}_{\rm H}$ и ток дуги $\overline{I}_{\rm H}$; ввод заданий на напряжения дуги $U_{\rm д3}$ и тока дуги $I_{\rm д3}$; ручной ввод и индикацию значений P_{us} и P_{vps} ; индикацию рабочей зоны аппроксимирующих функций (в параметрах $\overline{U}_{\rm H}$ и $\overline{I}_{\rm H}$), обеспечивающей точность аппроксимации по напряжению $\pm 1{\rm B}$ и току $\pm 10{\rm A}$.

Основной интерфейс КИИС изображен на рис. 1, a. По результатам наплавки формируется протокол наплавки (рис. 1, δ). В протокол заносится вся необходимая информация, которая в дальнейшем используется для анализа, обработки и формирования аппроксимирующих функций.

Для проведения упомянутых выше экспериментальных исследований было изготовлено девять опытных партий порошковых проволок диаметром 1,8; 2,4 и 2,8 мм для наплавки под флюсом, открытой дугой и в защитных газах. Металлическую часты шихты порошковых проволок рассчитывали таким образом, чтобы обеспечивалось получение наплавленного металла одного типа — 25Х5ФМС.

В качестве основного металла использовали пластины из стали Ст3 толщиной 15 мм. Опытными проволоками выполняли наплавку образцов в широком диапазоне режимов наплавки по току и

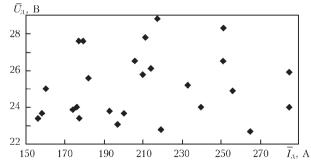


Рис. 2. Область использованных режимов при проведении экспериментов по наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,8 мм

напряжению. В выбранном диапазоне режимов фиксировали соотношения между положением потенциометров $P_{\rm vp}$ и $P_{\rm u}$ и средними значениями тока дуги $\overline{I}_{\rm g}$ и напряжения дуги $\overline{U}_{\rm g}$, записанными КИИС (см. рис. 1).

Всего выполнено девять серий экспериментов в приведенных ниже диапазонах режимов наплавки. Во всех экспериментах наплавку выполняли на одной скорости — 20 м/ч.

- 1. <u>19 экспериментов</u> по наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,8 мм; ток 160...260 А; напряжение 22...29 В.
- 2. <u>22 эксперимента</u> по наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром 2,4 мм; ток 180...300 A; напряжение 24...32 B.
- 3. <u>34 эксперимента</u> по наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром 2,8 мм; ток 200...300 А; напряжение 24...32 В.
- 4. <u>17 экспериментов</u> по наплавке под флюсом АН-26 порошковой проволокой диаметром 1,8 мм; ток 240...300 А; напряжение 26...31 В.
- 5. <u>25 экспериментов</u> по наплавке под флюсом АН-26 порошковой проволокой диаметром 2,4 мм; ток 220...400 А; напряжение 22...32 В.
- 6. <u>24 эксперимента</u> по наплавке под флюсом АН-26 порошковой проволокой диаметром 2,8 мм; ток 240...420 А; напряжение 22...38 В.
- 7. $\underline{14}$ экспериментов по наплавке в смеси защитных газов (82 % Ar + 18 % $\mathrm{CO_2}$) порошковой проволокой диаметром 1,8 мм; ток 220...310 A; напряжение 20...30 B.
- 8. $\underline{12}$ экспериментов по наплавке в смеси защитных газов (82 % Ar + 18 % $\mathrm{CO_2}$) порошковой проволокой диаметром 2,4 мм; ток 210...440 A; напряжение 22...40 B.
- 9. <u>26 экспериментов</u> по наплавке в смеси защитных газов (82 % Ar+18 % CO₂) порошковой





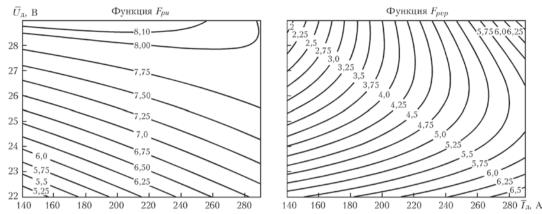


Рис. 3. Графики функций F_{pu} и F_{pvp} в зависимости от средних значений тока и напряжения дуги при наплавке открытой дугой самозащитной порошковой проволокой диаметром 1,8 мм

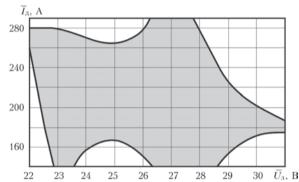


Рис. 4. Область режимов наплавки открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,8 мм, в которой погрешность аппроксимации по напряжению и току дуги при наплавке не превышает ± 1 B и ± 10 A, соответственно

проволокой диаметром 2,8 мм; ток 180...340 A; напряжение 22...40 B.

В таблице в качестве примера приведены результаты экспериментов, которые получены при наплавке открытой дугой самозащитной порошковой проволокой диаметром 1,8 мм, а на рис. 2 приведена область использованных режимов наплавки.

Был проведен регрессионный анализ данных, приведенных в таблице и на рис. 2, по результатам которого построены графики функций F_{pu} , F_{pvp} в зависимости от средних значений тока и напряжения дуги при наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,8 мм (рис. 3).

На рис. 4 приведена область режимов наплавки открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,8 мм в координатах $\overline{I}_{\rm A}/U_{\rm A}$, и в которой погрешность аппроксимации при задании напряжения и тока наплавки не превышает ± 1 В и ± 10 А, соответственно.

В результате выполнения всех девяти серий экспериментов были получены аналогичные зависимости между положением соответствующих

потенциометров регулирования напряжения и скорости подачи проволоки и вычисленными средними значениями тока дуги и напряжения дуги, записанными КИИС в процессе наплавки каждого из примерно двухсот наплавленных валиков.

Выводы

- 1. На базе портативного компьютера и современного программного обеспечения разработана информационно-измерительная система, которая предназначена для исследования особенностей дуговой наплавки. КИИС по мере накопления баз данных по технологиям дуговой наплавки различных деталей послужит основой для создания систем автоматического управления дуговой наплавкой.
- 2. По результатам экспериментальных исследований по наплавке порошковыми проволоками открытой дугой, в защитных газах и под флюсом определены зависимости между положением соответствующих потенциометров регулирования напряжения и скорости подачи проволоки и средними значениями тока и напряжения дуги для наплавки, задаваемыми технологом-наплавщиком. Это позволяет с помощью разработанной КИИС с высокой степенью точности устанавливать режимы наплавки по току и напряжению дуги без проведения наплавки контрольных образцов.
- 1. Экспертная система «Наплавка» / И.В. Бочарников, П.В. Гладкий, В.Ф. Демченко и др. // Наплавленный металл. Состав, структура, свойства. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992. С. 94–97.
- 2. Демченко В.Ф., Козлитина С.С., Рябцев И.А. Компьютерная система проектирования технологий дуговой наплавки // Автомат. сварка. 1998. № 11. С. 61—66.
- 3. Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла / Ю.Н. Ланкин, И.А. Рябцев, В.Г Соловьев и др. // Автомат. сварка. № 9. 2014. С. 27—32.

Поступила в редакцию 23.06.2015





УДК 621.791.75.03-52

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ТОРЦОВ ТРУБ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СВАРКЕ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Л.М. ЛОБАНОВ 1 , Н.М. МАХЛИН 2 , В.К.СМОЛЯКОВ 2 , В.Е.ВОДОЛАЗСКИЙ 2 , В.Е. ПОПОВ 2 , А.А. СВИРИЛЕНКО 3

¹ ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail:office@paton.kiev.ua ² Государственное предприятие «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины». 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: lectro@paton.kiev.ua ³ ПАО «ЧЕЗАРА». 14030, г. Чернигов, ул. Одинцова, 25. E-mail: mail@chezara.com

Приведены результаты разработок ИЭС им. Е.О. Патона и его специализированных подразделений по созданию отечественных образцов современного оборудования для подготовки под сварку торцов и кромок неповоротных стыков трубопроводов диаметром от 14 до 159 мм из сталей аустенитного и перлитного классов и высоколегированных сплавов при монтаже, ремонте и модернизации объектов энергетики, включая энергоблоки атомных и тепловых электростанций, в химическом и энергетическом машиностроении, на предприятиях нефтегазового комплекса и в других отраслях промышленности. Рассмотрены особенности построения разработанных торцевателей для обработки труб диаметром от 14 до 76 мм с толщиной стенки до 7,0 мм и труборезов для обработки кромок V- и U-образных разделок неповоротных стыков труб диаметром от 76 до 159 мм с толщиной стенки до 12 мм и основных составных частей этого оборудования. Показано, что по сравнению с зарубежными аналогами разработанное отечественное оборудование обладает рядом существенных преимуществ, позволяющих увеличить общую производительность механической обработки и сократить время пребывания персонала в зоне вредного воздействия на человека опасных факторов внешней среды. Библиогр. 26, табл . 6, рис. 6.

Ключевые слова: атомная энергетика, неповоротные стыки трубопроводов, автоматическая орбитальная сварка, механическая обработка, пневмоприводы, торцеватели, труборезы, суппорты, резцы

Введение. Трубопроводы объектов энергетики, нефтегазового комплекса, химических производств и других отраслей экономики в большинстве случаев являются базовыми элементами технологических цепей которые требуют выполнения значительного количества сварных соединений. Например, при монтаже одного энергоблока атомной электростанции (АЭС) с реактором водо-водяного типа необходимо выполнять не менее 120000 сварных соединений трубопроводов в виде, как правило, неповоротных стыков. Функции, которые выполняют трубопроводы энергоблоков АЭС, и их влияние на ресурс, надежность и ядерную безопасность, сложность условий их эксплуатации, при которой трубопроводы подвергаются воздействию (в большинстве случаев одновременному) высоких температур, повышенного давления, коррозионной и радиационной активности теплоносителя и других сред, затесненность в местах проведения сварочных работ и ограниченность доступа к этим местам обуславливают высокие требования к качеству, служебным свойствам и коррозионной стойкости сварных соединений таких трубопроводов [1-5]. Большинство аналогичных требований существует и в отношении трубопроводов объектов других отраслей экономики. Многочисленными исследованиями и долголетней практикой доказано, что удовлетворение этих требований возможно только при условии обеспечения высокого качества подготовки торцов труб или кромок неповоротных стыков трубопроводов под сварку путем их механической обработки с помощью специализированного металлорежущего оборудования [3–8]. Однако из-за того, что такое оборудование ранее в Украине не разрабатывалось и промышленно не изготавливалось, до настоящего времени организации и предприятия отрасли атомной энергетики и других отраслей экономики Украины вынуждены применять оборудование аналогичного назначения, которое поступает в Украину исключительно по импорту и по своим свойствам может удовлетворять украинских потребителей лишь частично. Кроме того, именно отсутствие отечественного современного оборудования для подготовки неповоротных стыков трубопроводов под сварку является одним из главных факторов, препятствующих широкомасштабной автоматизации сварочных работ при монтаже, ремонте и модернизации объектов энергетики и других отраслей экономики Украины.

С учетом изложенных выше обстоятельств, разработка отечественных технологий, а также со-

© Л.М. Лобанов, Н.М. Махлин, В.К.Смоляков, В.Е.Водолазский, В.Е. Попов, А.А. Свириденко, 2015



здание и освоение отечественного промышленного производства современного оборудования для подготовки неповоротных стыков трубопроводов под сварку является весьма актуальной задачей.

Цель настоящей работы состоит в рассмотрении некоторых важных особенностей процессов механической обработки торцов труб и кромок неповоротных стыков трубопроводов под сварку и оборудования для реализации этих процессов, а также в представлении результатов исследований, опытно-технологических и опытно-конструкторских работ, проведенных в 2013–2014 гг. в ИЭС им. Е.О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ в направлениях:

- определения и оптимизации требований к процессам подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов АЭС диаметром 14...219 мм и определения оптимальных параметров и режимов механической обработки торцов труб с толщиной стенки до 4,0 мм и кромок V- и U-образной разделок стыков труб с толщиной стенки до 12,0 мм;
- разработки конструктивных решений оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов диаметром 14...159 мм и разработки технической документации на опытные образцы соответствующего отечественного оборудования, подготовки их производства, изготовления, наладки, доводки, испытаний и опытно-промышленной проверки этих опытных образцов.

Исследования особенностей процессов подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов АЭС диаметром 14...219 мм. При проведении исследований и технологических работ изучалось влияние на качество сварных соединений точности подготовки кромок деталей трубопроводов, конструктивные элементы которых соответствуют требованиям ПН АЭ Г-7-009-089 и ОСТ 24.125.02-89, а также определялись области оптимальных режимов обработки резанием, которые должны обеспечивать соответствие подготовки кромок и поверхностей деталей трубопроводов требованиям действующих в отрасли атомной энергетики Украины нормативних документов.

Таблица 1. Линейные и угловые размеры образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T для имитации нерегулярного зазора

Размеры	Наибольшее значение нерегулярного зазора,			
трубы, но-		δ, мм		
минальный	0,3 0,5 0,7			
диаметр \times тол- щина стенки, ($D\times S$),мм	Угол отклонения от перпендикуляра к продольной оси трубы α, угл. град.			
18×2,5	1,23	1,72	2,88	
38×3,5	0,55	0,92	1,29	
57×4.0	0.36	0,60	0.84	

Для исследований использовались образцы деталей трубопроводов из стали 08X18H10T номинальными диаметрами 18, 38 и 57 мм с номинальной толщиной стенки 2,5, 3,5 и 4,0 мм соответственно, а также из стали 20 номинальными диаметрами 108, 159 и 219 мм с номинальной толщиной стенки 5,0, 6,5 и 12,0 мм соответственно. Кромки используемых для исследований образцов деталей трубопроводов обрабатывали с помощью универсального токарно-винторезного станка 1М61 и фрезерного станка 6Р82Ш.

Торцы образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T обрабатывались таким образом, чтобы применительно к сварному соединению типа С-39 имитировать отклонения плоскости торца образца от плоскости, перпендикулярной продольной оси трубы, то есть условия нерегулярного зазора, и отклонения внутренних диаметров подлежащих сварке деталей трубопроводов от нормативных значений, то есть условия соединения деталей с разной толщиной стенки.

Обработку торцов образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T для условий нерегулярного зазора при выполнении сварного соединения типа С-39 осуществляли в соответствии с табл. 1.

Обработку торцов образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T для условий соединения деталей с разной толщиной стенки при выполнении сварного соединения типа C-39 выполняли в соответствии с табл. 2

Обработку кромок разделок стыков образцов деталей трубопроводов из стали 20 для имитации отклонений от линейных и угловых размеров, регламентированных ПН АЭ Г-7-009-089 и ОСТ 24.125.02-89 для сварных соединений типа С-42, осуществляли в соответствии с рис. 1 и табл. 3. Асимметрия углов скоса кромок разделок образцов деталей трубопроводов из стали 20 для имитации отклонений от нормативных значений для труб с номинальными размерами 108×5,0, 159×6,5, 219×12,0 мм составляла 4, 8, 12 угл. град.

В процессе обработки образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T и стали 20 контроль их линейных и угловых размеров выполня-

Таблица 2. Линейные размеры образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T для имитации условий соединения деталей труб с разной толщиной стенки

Размеры трубы, номинальный	Разность внутренних диаметров соединяемых сваркой деталей (Δd), мм			
диаметр \times тол- щина стенки, ($D\times S$), мм	0,010 <i>D</i>	0,015 <i>D</i>	0,020D	
18×2,5	0,18	0,27	0,36	
38×3,5	0,38	0,57	0,76	
57×4,0	0,57	0,86	1,14	



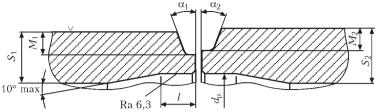


Рис. 1. Схема подготовки кромок разделки труб с толщиной стенки от 5,0 до 12,0 мм из стали 20 для имитации отклонений линейных или угловых размеров подлежащих сварке деталей от нормативных значений (условия асимметрии углов скоса кромок и условия соединения деталей труб с разным притуплением) при выполнении сварного соединения типа С-42

Таблица 3. Линейные размеры кромок разделок образцов деталей трубопроводов из стали 20 для имитации отклонений от регламентированних значений

	Разделка кромок								
	Диаметр р	Диаметр расточки $d_{ m p}$,мм		аметр расточки $d_{ m p}$,мм		Притупление $(S - M)$ при $S_1 = S_2$, мм			$= S_2, \text{ MM}$
Номинальные разме-			Толщина			$S_2 - M_2$			
ры трубы $(D \times \overline{S})$, мм	Номинальное значение	Наибольшее допустимое отклонение	стенки в ме- сте расточки, не менее	$S_1 - M_1$	$M_2 = M_1$	$M_2 = M_1 + 1$	$M_2 = M_1 + 1,5$		
108×5,0	100	+0,23	2,7	2,3+0,4	2,3+0,4	3,3+0,4	3,8+0,4		
159×6,5	149	+0,26	3,8	2,7 ^{+0,3}	2,7 ^{+0,3}	3,7+0,3	4,2+0,3		
219×12,0	199	+0,30	8,8	3,0-0,3	3,0-0,3	4,0-0,3	4,5 ^{-0,3}		

ли с помощью стандартных средств измерений, в частности, штангенциркулей ШЦ-П-160 и ШЦ-П-250 по ГОСТ 166 (наибольшая погрешность измерений ± 0.07 и 0.08 мм соответственно), стенкомеров индикаторных С-10А и С-25 по ГОСТ 11358 (наибольшая погрешность измерений ± 0.02 и ± 0.10 мм соответственно), угломера с нониусом УТ мод. 127 по ГОСТ 5378 с диапазоном измерения 0...180 угл. град. и наибольшей погрешностью измерений ± 2 угл. мин., набора щупов № 3 [9].

Обработанные в соответствии с табл. 1–3 образцы деталей трубопроводов диаметром 18 и 38 мм подвергали автоматической орбитальной сварке неплавящимся электродом в среде аргона (GTAW-сварке) способом автоопрессовки, для чего применяли автомат АДЦ 625 УЗ.1 для GTAW-сварки неповоротных стыков трубопроводов диаметром 18...42 мм. Для сварки образцов деталей трубопроводов диаметром 57 мм с толщиной стенки 4,0 мм способом последовательного проплавления использовали автомат АДЦ 626 УЗ.1 для GTAW-сварки неповоротных стыков трубопроводов диаметром 42...76 мм [10]. Образцы деталей трубопроводов с номинальными диаметрами 108 и 159 мм из стали 20 подвергали многопроходной GTAW-сварке с подачей присадочной проволоки и колебаниями неплавящегося электрода, для чего применяли автоматы АДЦ 628 УХЛ4 и АДЦ 629 УХЛ4 для GTAW-сварки неповоротных стыков трубопроводов диаметром 76...108 и 108...159 мм соответственно [11]. Образцы деталей трубопроводов с номинальным диаметром 219 мм подвергали многопроходной ручной ТИГ-сварке с пода-

40

чей присадочной проволоки, при этом применяли источник питания ИЦ 617 УЗ.1 для сварки неплавящимся электродом в среде инертних газов, модуль силовой питания МПС-101, регулятор сварочного тока РДГ-201 УЗ.1 [12], горелку АВІТІС GRIPP 26 (фирмы ABICOR BINZEL) с вольфрамовым электродом марки WT20 диаметром 3,15 мм и присадочную проволоку Св-08Г2С диаметром 1.6 mm.

Качество сварных соединений образцов деталей трубопроводов диаметром 18...159 мм контролировали визуальным, радиографическим и

Таблица 4. Оптимальные значения параметров режимов обработки деталей трубопроводов из стали 08X18H10T

		Значения параметров режимов резания		
Наименование операции	Номинальные размеры трубы $(D \times S)$, мм	Скорость резания, м/мин	Подача для чистового точения, мм/об	
Подрезка и отрезка	18×2,5	10,0	0,05	
Расточка внутрен-	38×3,5	12,0	0,06	
диаметра	57×4,0	15,0	0,07	
Формирование скоса кромки	108×5,0	10,0	0,08	
Формирование притупления	159×6,5	15,0	0,10	
Расточка внутрен- него диаметра	219×12,0	20,0	0,10	

капиллярным способами [13]. По результатам выполнения нескольких серий опытных сварок установлено:

– при выполнении сварных соединений типа C-39 труб диаметром 14...76 мм с толщиной стенки до 4 мм отклонения плоскости торцов подлежащих обработке и последующей сварке деталей от перпендикулярности относительно продольной оси трубы не должны превышать 1,23 угл. град. для труб 18×2,5; 0,55 угл. град. для труб 38×3,5; 0,36 угл. град. для труб 57×4,0 и так далее, но во всех случаях должны быть не более 0,30 мм, так как при отклонениях, превышающих это значение, очень высока вероятность возникновения таких дефектов сварных соединений, как «проседания» шва, непровары, несплавления кромок, подрезы;

— отклонения внутренних диаметров подлежащих сварке деталей от нормативных значений при выполнении сварных соединений типа С-39 не должны превышать значения $0,01D_{\text{ном}}$, где $D_{\text{ном}}$ — номинальный внешний диаметр трубы, несоблюдение этого требования приводит к образованию таких дефектов, как нарушения регламентированной формы сварного шва, непровары, несплавления кромок, «утяжины» в корне шва;

– асимметрия углов скоса кромок разделок образцов деталей трубопроводов при выполнении сварных соединений типа С-42 не должна превышать 4 угл. град., при больших значениях асимметрии углов скоса характерны такие сплошные дефекты, как недопустимые нарушения формирования сварного шва, несплавления кромок и отдельных валиков, непровары в заполняющих проходах, «провисания» части шва возле кромки с завышенным углом скоса, подрезы в облицовочном шве;

- отклонения расточки внутренних диаметров от нормативных значений при выполнении сварных соединений типа С-42 не должны превышать +0.23 мм для труб 108×5.0 ; +0.26 мм для труб $159 \times 6,5$; +0,30 мм для труб $219 \times 12,0$, а разность между притуплениями обеих кромок не должна превышать 0,5 мм, поскольку сварные соединения деталей трубопроводов, у которых притупление одной из кромок отличается от притупления другой более, чем на 0,5 мм, склонны к таким дефектам корневого шва, как нарушения его регламентированной формы, непровары, «проседания» шва с одной его боковой стороны и «утяжины» или несплавления с другой, при этом в случае использования режимов сварки модулированным током даже при разности между притуплениями кромок до 0,75 мм дефекты корневого шва встречаются редко, а на некоторых образцах их вовсе не выявлено.

Кроме изучения влияния на качество сварных соединений точности подготовки под сварку кромок деталей трубопроводов, также проводили исследования по определению областей оптимальных режимов обработки резанием. Необходимость выполнения таких исследований обуславливается особенностями коррозионностойких сталей аустенитного класса (например, марки 08Х18Н10Т), относящихся к основным материалам, которые используются для трубопроводов АЭС, а также особенностями процессов их механической обработки.

Одна из важных особенностей коррозионностойких сталей заключается в том, что их структура представляет собой твердый раствор аустенитного класса с гранецентрированной кубической решеткой [14]. Из всех видов обработки стали аустенитного класса наиболее тяжело поддаются механической обработке, что объясняется рядом факторов, главным их которых является склонность таких сталей к наклепу, при этом даже незначительные деформации вызывают сильное упрочнение металла. При обработке резанием большая вязкость сталей аустенитного класса вызывает образование длинной стружки, что также ухудшает условия обработки. Низкая теплопроводность коррозионностойких сталей обуславливает повышенную температуру в зоне резания и, вследствие этого, активизацию явлений адгезии и диффузии, а также интенсивного схватывания контактных поверхностей и разрушения рабочей части инструмента.

Экспериментальные и технологические работы по определению областей оптимальных режимов обработки резанием выполняли на образцах деталей трубопроводов из стали 08Х18Н10Т номинальным диаметром 18, 38, 57, 108, 159 и 219 мм с толщиной стенки 2,5, 3,5, 4,0, 5,0, 6,5 и 12,0 мм соответственно, при этом использовали рекомендации, вытекающие из многолетних исследований в направлении механической обработки сталей аустенитного класса и имеющегося производственного опыта такой обработки [14]. Согласно этим рекомендациям, в случае тонкого внешнего продольного точения и подрезания деталей из стали 08Х18Н10Т область оптимальных значений скорости резания ограничена диапазоном от 10 до 40 м/мин, при этом значения поправочных коэффициентов K_{n} и K_{n} , первый из которых учитывает влияние на скорость резания физико-механических свойств заготовки из коррозионностойкой стали, а второй — влияние на скорость резания состояния поверхности этой заготовки, составляют 0,8 и 0,9 соответственно. Рекомендованные значения подачи для чистового точения деталей из жаростойких и нержавеющих сталей резцами



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

с твердосплавными пластинками — от 0,04 до 0,12 мм/об.

В результате исследований по определению областей оптимальных режимов обработки резанием деталей трубопроводов из стали 08X18H10T установлено, что оптимальные значения параметров режимов резания должны соответствовать приведенным в табл. 4.

Особенности построения нового оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов. Анализ информации о параметрах, характеристиках и построении лучших зарубежных образцов оборудования для обработки торцов и кромок подлежащих сварке деталей трубопроводов, например, производства фирм «PROTEM», «POLYSOUDE» (Франция), «ARC MACHINES» (США), «ESAB», «Atlas Copco» (Швеция), «Georg Fischer», «DEPRAG» (ФРГ), «ISCAR» (Израиль), ООО «Петербургская промышленная компания» (Россия), Аотаі (Китай) [15–23 и др.], показывает, что этим аналогам присущи следующие основные недостатки:

- преимущественно внутреннее базирование, вызывающее определенные усложнения при осуществлении обязательного оперативного контроля геометрических размеров торцов труб или разделок кромок неповоротных стыков трубопроводов и существенно увеличивающее количество и продолжительность подготовительно-заключительных операций и, следовательно, продолжительность пребывания персонала в зоне радиоактивного загрязнения;
- отсутствие некоторых важных опций, необходимых для выполнения требований действующих в Украине ПН АЭ и других нормативных документов (например, торцеватели импортного происходжения не способны обеспечивать внутреннюю расточку труб);
- высокая стоимость и значительные эксплуатационные затраты.

Поэтому одной из главных задач при разработке отечественного оборудования для механической обработки торцов и кромок подлежащих сварке деталей трубопроводов являлось создание таких моделей оборудования, которые были бы свободны от недостатков, свойственных зарубежным аналогам, но вместе с тем были бы близки к этим аналогам по массе.

Ранее проведенными исследованиями и производственной практикой достоверно установлено, что достижение высокого качества механической обработки торцов труб или кромок разделок неповоротных стыков трубопроводов, их сборки и последующей сварки возможно при условии, если механизмы обработки, сборки, центрирования и осуществления сварки базируются по внешней поверхности трубы [24]. Именно такое базиро-

вание и заложено в основу построения моделей отечественного оборудования для подготовки неповоротных стыков трубопроводов под сварку, разработанных ИЭС им.Е.О.Патона совместно с НИЦ СКАЭ.

Любое устройство для механической обработки торцов труб или кромок разделок неповоротных стыков трубопроводов содержит такие основные составные части, как движитель электрический или пневматический привод, понижающий редуктор, планшайба с установленным на ней суппортом (суппортами), каждый из которых оснащен одним или двумя держателями резцов, механизм подачи резцов.

Движитель является одним из самых важных и необходимых узлов оборудования для подготовки неповоротных стыков трубопроводов под сварку. С учетом назначения и особенностей такого оборудования и специфических условий его эксплуатации на АЭС наиболее целесообразным представляется исполнение движителей этого оборудования в виде пневмоприводов.

Основой любого пневмопривода является пневмодвигатель. По сравнению с движителями других типов пневмодвигатели имеют ряд преимуществ, среди которых можно отметить: значительно меньшие удельный объем, габаритные размеры и массу, чем у электродвигателей с аналогичными энергетическими параметрами (мощность и т.п.), способность надежно работать в условиях одновременного воздействия высокой температуры и влажности внешней среды, значительной вибрации и ударов, более высокие, чем у электродвигателей, показатели надежности, принципиальную возможность (в отличие от электродвигателей) обеспечивать выполнение требований безопасности при эксплуатации в опасных и особо опасных условиях, гораздо более простое и дешевое техническое обслуживание.

Наиболее высокой надежностью характеризуются получившие наибольшее распространение пневмодвигатели лопаточного типа [25], в которых момент вращения определяется площадью поверхности лопаток, подвергаемой давлению сжатого воздуха, и уровнем этого давления, что дает возможность регулирования скорости и момента вращения пневмодвигателя путем изменения давления поступающего в него воздуха.

Характерными особенностями пневмодвигателей лопаточного типа являются необходимость обеспечения конструктивной прочности и жесткости цилиндра — корпуса и высокой точности обработки его внутренних поверхностей, что, с одной стороны, требует изготовления заготовки корпуса ковкой или же с использованием других довольно технологически сложных способов формообра-



Таблица 5. Основные показатели пневмодвигателя машины ручной пневматической угловой ИП 21230

Наименование показателя	Номиналь-
Transferrobatine frokasaresisi	ное значение
1. Мощность на выходном валу, Вт	1300_130
2. Частота вращения выходного вала на хо-	6400_{-640}
лостом ходу, об/мин	
3. Удельный расход воздуха, м ³ /мин	1,5±0,15
4. Давление сжатого воздуха, МПа (кгс/см²)	0,63 (6,3)
5. Габаритные размеры, мм, не более:	350
длина	164
ширина	140
высота	
6. Масса, кг, не более	3,1

зования, а с другой — обязательного применения не только высокоточных металлообрабатывающих станков, а и специализированной технологической оснастки и нестандартных устройств для контроля линейных и угловых размеров, и выполнения требований к оптимальному профилю и точности изготовления лопаток ротора, к зазорам между кромками лопаток и внутренними поверхностями корпуса и к исполнительным размерам выходного отверстия. Отмеченные особенности изготовления пневмодвигателей обуславливают существенные первичные затраты на технологическое оборудование и оснащение, а также на подготовку производства, что может быть экономически оправдано только при условии крупносерийного или массового производства. Следует также принимать во внимание, что до настоящего времени отечественное производство пневмодвигателей отсутствует.

Учитывая упомянутые обстоятельства и стремление к унификации основных составных частей отечественного оборудования для механической обработки торцов и кромок подлежащих сварке деталей трубопроводов, представляется рациональным и экономически целесообразным использование серийных пневмодвигателей отработанных моделей пневмоинструмента, в частности, импортируемого из стран СНГ или Юго-Восточной Азии, например, пневмодвигателя машины ручной шлифовальной пневматической угловой ИП 21230. Основные показатели такого пневмодвигателя приведены в табл. 5.

Для обеспечения реальных режимов механической обработки планшайба оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов с установленным на ней режущим инструментом должна вращаться со скоростью, значительно меньшей по сравнению со скоростю вращения выходного вала пневмодвигателя, чего возможно достичь только путем соответствующей редукции. Это обуславливает обязательное наличие в составе оборудования для подготовки

под сварку неповоротных стыков трубопроводов специальной трансмиссии — редуктора.

Известны редукторы различных типов, основными из которых являются планетарные, геликоидальные и червячные. В сравнении с редукторами других типов планетарным редукторам присущи высокий коэффициент полезного действия (КПД), низкий момент инерции, способность воспроизведения больших передаточных чисел, а также наименьшие габаритные размеры относительно создаваемого редуктором момента вращения [8, 26]. Помимо этого, важными преимуществами планетарных редукторов являются возможность простого фланцевого подсоединения, нахождения вала редуктора в центре, свободный выбор пространственного положения. Отмеченные достоинства планетарных редукторов предопределили при построении моделей отечественного оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов выбор двуступенчатого однорядного редуктора именно этого типа, при этом во всех разработанных моделях торцевателей и трубореза используется не только один и тот же унифицированный пневмопривод, но и один и тот же унифицированный вариант планетарного редуктора.

На базе теоретических основ проектирования деталей машин и механизмов и имеющегося опыта разработки и конструирования оборудования для обработки металлов резанием с учетом свойств материалов, которые подвергаются механической обработке при подготовке под сварку деталей трубопроводов, условий такой обработки и требований к процессам подготовки неповоротных стыков трубопроводов АЭС диаметром 14...159 мм под их сварку разработаны кинематические схемы опытных образцов торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 (для труб диаметром от 14 до 38 мм с толщиной стенки до 5,0 мм) и ТРЦ 76 УЗ.1 (для труб диаметром от 38 до 76 мм с толщиной стенки до 7,0 мм) и трубореза ТТЦ 660 УЗ.1 (для трубопроводов диаметром от 108 до 159 мм с толщиной стенки до 15,0 мм), при этом выполнены кинематические и силовые расчеты трансмиссий и механизмов планшайб этих торцевателей и трубореза, расчеты прочности и долговечности элементов таких трансмиссий и механизмов, а также расчеты сил резания, что позволило осуществить выбор необходимых материалов.

На рис. 2 приведена кинематическая схема разработанных отечественных торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1, а на рис. 3 — кинематическая схема трубореза ТТЦ 660 УЗ.1.

Исследования и практика показывают, что одним из основных факторов, ограничивающих возможности обработки деталей трубопроводов в

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

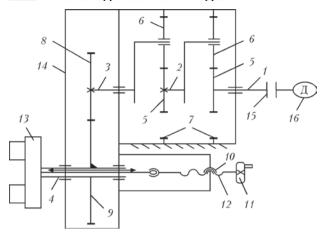


Рис. 2. Кинематическая схема торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1: I-4 — валы кинематических звеньев; 5-9 — шестерни кинематических звеньев; 10 — гайка; 11 — маховичок; 12 — винт ходовой; 13 — планшайба; 14 — корпус; 15 — муфта; 16 — пневмодвигатель

зонах повышенной агрессивности окружающей среды и допустимую продолжительность пребывания в таких условиях производственного персонала, является интервал времени, который необходим для осуществления как собственно процесса резания, так и переналадки режущего инструмента. Поэтому один из путей повышения эффективности оборудования для обработки деталей трубопроводов АЭС заключается в таком построении планшайбы, которое предусматривает возможность одновременной обработки нескольких поверхностей за счет наличия в ее конструкции нескольких держателей резцов, что способствует максимально возможному сокращению длительности собственно процесса резания и переналад-

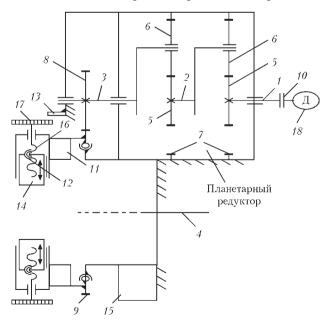


Рис. 3. Кинематическая схема трубореза ТТЦ 660 УЗ.1: I— валы кинематических звеньев; 5—9 — шестерни кинематических звеньев; 10 — муфта; 11 — планшайба; 12 — гайка; 13 — фиксатор поворота; 14 — суппорт; 15 — корпус; 16 — винт ходовой; 17 — колесо зубчатое; 18 — пневмодвигатель

ки режущего инструмента. Исходя из этого, предложены технические решения, согласно которым на планшайбе каждого из торцевателей устанавливаются два диаметрально расположенных суппорта, что предоставляет возможность одновременной обработки торцов труб с помощью четырех резцов. При этом за один проход одновременно выполняется торцовка трубы, формируются внешняя и внутренняя фаски и осуществляется внутренняя расточка трубы. Аналогичные подходы характерны и для построения конструкции разъемного трубореза, планшайбу которого предложено выполнить в виде револьверной головки с двумя поперечными суппортами и одним расточным, что позволяет совмещать работу нескольких резцов различной конфигурации — например, в каждом из двух поперечных суппортов можно закрепить по одному отрезному резцу, или же в одном поперечном суппорте — отрезной, а в другом – проходной резец, причем этот резец может быть налажен для выполнения внешней фаски. Следует также отметить, что одновременное использование двух суппортов с установленными в них режущими инструментами позволяет существенно повысить надежность оборудования за счет уравновешивания изгибающих усилий, неизбежно возникающих в процессе резания и отрицательно влиящих на элементы кинематического звена, в состав которого входят выходной вал редуктора и зубчатая передача от редуктора к планшайбе.

Узлы реверсивной подачи торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1, обеспечивающие подачу вручную, выполнены по одной и той же конструктивной схеме, предусматривающей возможность перемещения в любом из двух возможных направлений планшайбы торцевателя вместе с закрепленными в ее ползунах (резцедержателях) резцами путем взаимодействия штока узла подачи со штоком планшайбы. В труборезе ТТЦ 660 У3.1 предусмотрена автоматическая подача резцов с помощью ходового винта, на котором установлено зубчатое колесо типа «звездочка». В момент завершения одного полного оборота планшайбы зубчатое колесо совершает вращательное движение на один свой зубец и фиксируется в этом положении с помощью подпружиненного шарика, в результате чего осуществляется соответствующее вращательное движение ходового винта и, вследствие этого, поступательное движение установленного на планшайбе ползуна с резцом на один шаг автоматической подачи. Условие поворота зубчатого колеса типа «звездочка» поперечного суппорта от одного фиксированного положения к следующему только на один зубец обеспечивается при помощи фиксатора поворота, жестко закрепленного на одном из неподвижных корпусов трубореза.



Таблица 6. Основные параметры и характеристики опытных образцов торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1 и трубореза ТТЦ 660 УЗ.1 и их аналогов

	Модель				
Наименование параметра или характеристики	ТРЦ 38УЗ.1	ТРЦ 76УЗ.1	ТТЦ 660УЗ.1	Мангуст-2Т (Россия)	PROTEM PUS40 (Франция)
1. Наименьший внешний диаметр обрабатываемой трубы, мм	14	38	108	45	43
2. Наибольший внешний диаметр обрабатываемой трубы, мм	38	76	159	120	219
3. Наибольшая толщина стенки обрабатываемой трубы, мм	5,0	7,0	15,0	5,0	16,0
4. Длина расточки внутреннего диаметра обрабатываемой трубы, мм, не менее	10	15	20	Опция расто	чки отсутствует
5. Базирование	На внец	иней поверхно	ости трубы	Вну	треннее
6. Способ подачи резца	Вручную	Вручную	Автоматически	Вручную	Вручную
7. Подача резца, мм/об, не более	0,20	0,15	0,10	0,20	0,20
8. Частота вращения планшайбы номинальная, об/мин	110	100	60	70	25
9. Расход сжатого воздуха во время холостого хода, м ³ /мин, не более	1,5	1,5	1,5	1,7	1,6
10. Габаритные размеры, мм, не более	350×140×170	370×160×175	520×500×435	470×400×120	400×246×246
11. Масса с приводом, кг, не более	9,5	12,6	19,3	9,5	16,0

Проведенными исследованиями особенностей процессов подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов и производственным опытом установлено, что точность механической обработки торцов труб и кромок разделок неповоротных стыков трубопроводов, а также чистота обработанных поверхностей во многом зависят от точности и повторяемости центрирования торцевателей и труборезов на обрабатываемых трубах. Анализ возможных конструктивных решений оборудования для подготовки под сварку показал, что обеспечение неизменности первоначального внешнего базирования моделей этого оборудования (преимущественно торцевателей) достижимо в случае, если их конструкция предусматривает наличие механизма самоцентрирования. Исходя из этого, в процессе разработки отечественного оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов предложено техническое решение*, согласно которому в состав устройства для обработки торцов и кромок входит неподвижная головка, содержащая механизм базирования по внешней поверхности трубы и неподвижный корпус, внутри которого установлена планшайба с размещенными на ней держателями резцов. Благодаря наличию, (по крайней мере, двух) быстродействующих подпружиненных фиксаторов, например, рычажного типа, неподвижный механизм базирования имеет возможность быстрого соединения с неподвижным корпусом головки или отсоединения от этого корпуса. Кроме этого, головка содержит еще и механизм самоцентрирования, например, цангового типа, который соосно с продольной осью обрабатываемой трубы и продольной осью механизма базирования

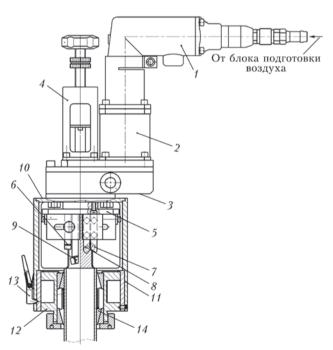


Рис. 4. Конструктивная схема торцевателя с механизмом самоцентрирования: 1 — привод (пневмодвигатель); 2 — редуктор; 3 — неподвижный корпус; 4 — механизм подачи; 5 — планшайба; 6–9 — резцы подрезной, проходные (для формирования внешней и внутренней фасок соответственно); 10 — головка; 11 — неподвижный корпус головки; 12 — механизм базирования; 13 — быстродействующие подпружиненные фиксаторы; 14 — механизм самоцентрирования

 $[\]ast$ Заявка UA 201503704 від 20.04.2015, МПК: В23К 9/235 (2006.01) Портативний пристрій для обробки торців та крайок труб при їх підготуванні до зварювання / Л.М. Лобанов, В.К. Смоляков, В.Є. Водолазський, Н.М. Махлін.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 5. Общий вид опытных образцов торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1 (слева)

жестко соединен с последним. На рис. 4 приведена конструктивная схема торцевателя, построенного с использованием предложенного решения.

По разработанной ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины» технической документации в ПАО «ЧЕЗАРА», г. Чернигов, были изготовлены опытные образцы торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1 и трубореза ТТЦ 660 УЗ.1. общий вид которых приведен на рис. 5 и 6. Изготовленные опытные образцы оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов подвергались всесторонним испытаниям, включая общетехнические и функциональные. В НИЦ СКАЭ совместно со специалистами ОП «Атомремонтсервис» ГП «НАЭК «Энергоатом» были произведены технологические испытания. Результаты проведенных испытаний опытных образцов торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1 и ТРЦ 76 УЗ.1 и трубореза ТТЦ 660 УЗ.1 и их параметры и характеристики приведены в табл. 6.

Выводы

- 1. Рассмотрены вопросы влияния на качество сварных соединений точности подготовки под сварку кромок деталей неповоротных стыков трубопроводов АЭС диаметром от 14 до 159 мм из сталей аустенитного и перлитного классов, определены области оптимальных режимов механической обработки торцов и кромок этих трубопроводов, а также рассмотрены особенности построения оборудования для подготовки под сварку неповоротных стыков трубопроводов, разработаны, изготовлены и испытаны опытные образцы такого отечественного оборудования.
- 2. Результаты испытаний опытных образцов торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1, ТРЦ 76 УЗ.1 и трубореза ТТЦ 660 УЗ.1 свидетельствуют о том, что в сравнении с лучшими зарубежными образцами оборудования для подготовки под ручную или автоматическую сварку деталей неповоротных стыков труб они обеспечивают:

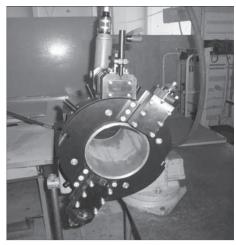


Рис. 6. Общий вид опытного образца трубореза ТТЦ 660 УЗ.1

- расширение технологических возможностей оборудования для подготовки под сварку деталей неповоротных стыков стальных трубопроводов;
- повышение производительности процессов механической обработки неповоротных стыков стальных трубопроводов за счет упрощения условий выполнения контроля внутреннних геометрических размеров обрабатываемых труб;
- упрощение и удешевление обслуживания оборудования для подготовки под сварку деталей неповоротных стыков стальных трубопроводов за счет максимально возможного использования в этом оборудовании отечественных комплектующих изделий и материалов и существенного улучшения его ремонтопригодности;
- снижение не менее, чем в 1,5...2,0 раза себестоимости этой продукции;
- повышение качества и точности подготовки под сварку, в том числе автоматическую, деталей неповоротных стыков стальных трубопроводов.

Отмеченные преимущества разработанного отечественного оборудования касаются преимущественно торцевателей и достигаются за счет технических решений относительно их базирования на внешней поверхности обрабатываемых труб, обеспечения возможности одновременного торцевания, формирования внешней и внутренней фасок и расточки внутреннего диаметра этих труб, а также быстрого соединения/отсоединения неподвижного механизма базирования рабочей головки с ее неподвижным корпусом.

3. Разработка, изготовление и испытания опытных образцов торцевателей ТРЦ 38 УЗ.1, ТРЦ 76 УЗ.1 и трубореза ТТЦ 660 УЗ.1 и дальнейшее освоение их промышленного производства создают необходимые предпосылки для оснащения монтажных и ремонтных подразделений и предприятий отрасли энергетики и других отраслей современным отечественным оборудованием для подготовки под сварку деталей неповоротных стыков стальных трубопроводов, что обеспечит



устранение одного из главных факторов, препятствующих широкомасштабному внедрению как отработанных, так и новейших отечественных технологий автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов.

- 1. *Камерон И*. Ядерные реакторы / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.
- 2. ПН АЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомнадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1990. 168 с.
- 3. ПН АЭ Г-7-009-90, ПН АЭ Г-7-010-90. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения // Госатомнадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 320 с.
- 4. Сварка при монтаже оборудования и металлоконструкций реакторных установок / В.В. Рощин, В.А. Хаванов, Л.И. Акулов, В.А. Букаров // Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ. М.: ИздатАТ, 2002. Т.1. С. 81–118.
- К вопросу об автоматизации сварки монтажных стыков трубопроводов атомных электростанций / В.И. Гриненко, В.В. Рощин, В.А. Хаванов, С.И. Полосков // Технология машиностроения. – 2008. – № 8. – С. 48–51.
- 6. *Белкин С.А., Шефель В.В.* Автоматическая аргонодуговая сварка при монтаже трубопроводов АЭС // Энергетическое строительство. 1985. № 11. С. 43–46.
- 7. *Букаров В.А.* Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах //Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ. М.: Издат АТ, 2002. Т.1. С. 149–210.
- 8. Волков В.А. Специальное металлорежущее оборудование // Технология машиностроения. -2000. -№ 5. -C. 6-10.
- 9. *Троицкий В.А.* Визуальный и измерительный контроль металлоконструкций и сооружений. Киев: Феникс, 2012. 276 с.

- Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций / Н.М. Махлин, А.Е. Коротынский, В.А. Богдановский и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 11. – С. 34–44.
- 11. *Махлін Н.М., Коротинський О.Є., Свириденко А.О.* Апаратно-програмні комплекси для автоматичного зварювання неповоротних стиків трубопроводів атомних електростанцій // Наука та інновації. 2013. Т.9, № 6. С. 31–45.
- 13. *Троицкий В.А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. Киев: Феникс, 2006. 320 с.
- Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение–1, 2001. Т.2. 944 с.
- 15. http://www.protem.fr/
- 16. http://www.polysoude.com/
- 17. http://www.arcmachines.com/
- 18. http://www.esab.com/
- 19. http://www.atlascopco.com
- 20. http://www.georgfischer.com
- 21. http://www.deprag.com
- 22. http://www.iscar.com
- 23. http://www.pkfppk.ru/
- Белоусов А.Н., Чернышов Г.Г. Некоторые вопросы подготовки стыков труб под сварку // Свароч. пр-во. – 1977. – № 4. – С. 39–41.
- 25. http://www.immerservice.ru/privod/pnevmodvigateli/
- 26. *Проектирование* механических передач: Учебно-справочное пособие для втузов / С.А. Чернавский, Г.А.Снесарев, Б.С.Козинцев и др. М.: Машиностроение, 1984. 560 с.

Поступила в редакцию 18.06.2015



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная компания «ХОБЭКС электрод»



IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»

Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции по сварочным материалам (1966 г.) и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).

17–20 мая 2016 г. г. Волгоград

Тематика конференции

- Совершенствование дуговых процессов сварки
- Разработка инновационных сварочных материалов
- Технологии производства материалов и подготовка кадров
- Качество и конкурентоспособность материалов

http://association-electrode.com

Информационная поддержка: журнал «Автоматическая сварка».





УЛК 621.791.364.03

АВТОВАКУУМНАЯ ПАЙКА ПРИ РЕМОНТЕ МЕДНЫХ ПАНЕЛЕЙ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Г.М. ГРИГОРЕНКО, А.Л. ПУЗРИН, М.Г. АТРОШЕНКО, М.А. ПОЛЕЩУК, А.В. ШЕВЦОВ, И.А. МОССОКОВСКАЯ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail:office@paton.kiev.ua

Проверена на моделях возможность ремонта изношенных плоских панелей кристаллизаторов МНЛЗ путем автовакуумной пайки восстановительного медного слоя. Получен паяный шов между двумя медными пластинами без дефектов в виде пор и трещин. Исследован предел прочности медного паяного соединения на отрыв между слоями, а также проведены испытания на изгиб. Проведена оценка термического сопротивления паяного шва. Полученные результаты позволяют рекомендовать способ автовакуумной пайки для ремонта плоских панелей кристаллизаторов. Библиогр. 12, рис. 6.

Ключевые слова: кристаллизаторы МНЛЗ, восстановительный ремонт, автовакуумная пайка, паяные швы, металлография, механические свойства, термическое сопротивление

В настоящее время основное количество выплавляемой стали разливают на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Расплавленную сталь заливают в специальные устройства — водоохлаждаемые кристаллизаторы, внутренняя полость которых имеет сечение, соответствующее сечению будущей заготовки. Стенки кристаллизаторов, обращенные внутрь, изготавливают из меди. Благодаря интенсивному отводу тепла охлаждающей водой происходит затвердевание жидкого металла на внутренней стенке кристаллизатора. При этом по всему периметру его полости формируется стальная корочка, образующая наружную поверхность выплавляемой заготовки. В процессе вытягивания заготовки происходит перемещение твердой стальной корочки вдоль медной стенки кристаллизатора, что приводит к неравномерному истиранию последней и образованию на ней различных протяженных дефектов [1].

Особенно интенсивно эти дефекты образуются при выплавке заготовок прямоугольного сечения на МНЛЗ радиального типа. Кристаллизаторы для выплавки таких заготовок собирают из отдельных плоских панелей с рабочей стенкой из меди, легированной малым количеством серебра или хрома. Площадь некоторых из них может достигать одного квадратного метра [2].

Для ликвидации дефектов медные стенки панелей кристаллизаторов необходимо подвергать периодической механической обработке. Утонение стенок после многократных обработок вызывает опасность вскрытия каналов водяного охлаждения и выхода из строя всего кристаллизатора. Поэтому задача восстановления первоначальных размеров медных стенок плоских панелей является актуальной.

Электродуговая наплавка изношенных медных стенок с последующей механической обработкой не позволяет решить данную проблему, поскольку при локальном нагреве больших медных плит, обладающих высокой теплопроводностью, происходит недопустимое их коробление, неподдающееся исправлению [3].

Разработан способ нанесения восстановительного слоя меди на медные плиты методом сварки трением с перемешиванием [4]. Этот способ достаточно эффективен при ремонте отдельных участков медных стенок кристаллизаторов, но применение его на поверхностях большой площади также требует дополнительных мероприятий для снижения коробления ремонтируемых плит.

Избежать коробления стенок кристаллизаторов при восстановительном ремонте можно путем припаивания к ним по всей поверхности медного листа необходимой толщины. В этом случае нагрев и охлаждение изделия проходит равномерно по всему объему не вызывая его деформации.

Для обеспечения эффективной работы кристаллизатора МНЛЗ с отремонтированными медными стенками необходимо в процессе пайки минимизировать дополнительное тепловое сопротивление, которое вносит слой припоя в коэффициент теплопередачи от расплавленной стали к охлаждающей воде через многослойную стенку. Этот коэффициент будет минимальным при соблюдении следующих условий: по всей поверхности соединяемых медных листов необходимо иметь бездефектный слой припоя минимальной толщины; коэффициент теплопроводности припоя должен быть близок к соответствующему коэффициенту меди.

Из всех известных видов пайки самое качественное соединение поверхностей большой пло-

© Г.М. Григоренко, А.Л. Пузрин, М.Г. Атрошенко, М.А. Полещук, А.В. Шевцов, И.А. Моссоковская, 2015



щади получается способом автономной вакуумной пайки (АВП). Технология АВП основана на самопроизвольной очистке от оксидных пленок металлических поверхностей, образующих герметичный зазор, и последующее заполнение его расплавленным припоем при нагреве изделия для пайки. Этот процесс происходит благодаря диффузии кислорода из герметичного зазора через оксидную пленку вглубь горячего металла. При этом в зазоре образуется автономный вакуум. Разрушение оксидных пленок в герметичном зазоре начинается после достижения вакуума определенной степени. Время очистки металлических поверхностей от оксидных пленок может быть значительно сокращено путем вакуумирования герметичного зазора перед нагревом [5].

Этим способом в промышленности в условиях завода «Азовмаш» успешно изготавливают стальные биметаллические заготовки площадью до 4 м² [6]. Однако в литературе отсутствуют сведения о применении АВП для соединения между собой мелных листов.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальной проверке возможности получения методом АВП качественного соединения медных листов и применения этого способа для восстановления размеров медных стенок кристаллизаторов МНЛЗ.

Для обеспечения качества пайки на любом участке соединения плоских изделий большой площади целесообразно использовать схему АВП с горизонтальным расположением паяемого изделия. При этом припой в виде фольги необходимо заранее разместить между медными листами по всей площади контакта. Опытные работы проводились пайкой пакетов размером 80×80 мм.

Подготовленные к пайке пакеты устанавливали в специальные кассеты, создающие замкну-

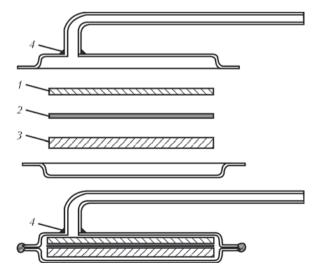


Рис. 1. Сборка кассеты для АВП образцов: I — восстановительный слой; 2 — припой; 3 — основной металл; 4 — технологические сварные швы

тый объем (рис. 1). Материалом для изготовления кассет служил тонкий стальной лист, который при температуре пайки обеспечивал сжатие пакета атмосферным давлением равномерно по всей поверхности. Пакеты набирали из трех слоев: основной металл, имитирующий стенку кристаллизатора, восстановительный слой и припой между ними. В качестве основного металла использовали медь марки М-1 толщиной 7 мм, а восстановительный слой из меди той же марки имел толщину 2 мм. Припоем служила фольга толщиной 0,2 мм, укладываемая в два слоя.

Заполненные кассеты заваривали по периметру аргонодуговой сваркой вакуумноплотным швом. Для вакуумирования в кассету вваривали патрубок. Подготовленные кассеты размещались на столе в муфельной печи, патрубок выводился наружу, к нему подключали форвакуумный насос, оборудованный мановакуумметром.

Перед пайкой внутри кассеты создавали разряжение $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. и перекрывали вентиль. Печь нагревали до необходимой температуры пайки с изотермической выдержкой 30 минут. Кассеты охлаждались вместе с печью. Во время всего процесса пайки разряжение внутри кассеты контролировали мановакуумметром. Паяные пакеты разрезали на образцы для проведения металлографических исследований и механических испытаний.

Для выбора оптимального химического состава припоя, с учетом его температуры плавления и коэффициента теплопроводности, опыты проводились с использованием фольги двух различных марок: латуни Л63 (температура пайки 950...960 °C), часто применяемой для пайки меди, и бериллиевой бронзы БрБ2 (температура пайки 1030...1040 °C), имеющей коэффициент теплопроводности близкий к таковому у меди.

При металлографических исследованиях нетравленых паяных соединений на образце с припоем из латуни Л63 по всей длине паяного шва [7] наблюдаются продолговатые поры длиной от 100 до 330 и шириной от 20 до 50 мкм, расположенные близко к середине шва. Между некоторыми порами имеются трещины (рис. 2, а). Образование пор в паяном соединении с использованием припоя из латуни Л63 объясняется испарением цинка во время пайки [8]. Испарение цинка подтверждается увеличением показаний мановакуумметра при повышении температуры печи выше 500 °C. В то же время на нетравленом шлифе с припоем БрБ2 (рис. 2, δ) место соединения основного металла и восстановительного слоя практически не заметно, поры и трещины отсутствуют.

На рис. 2 показаны структуры паяных соединений, выявленные травлением в 50%-ом растворе

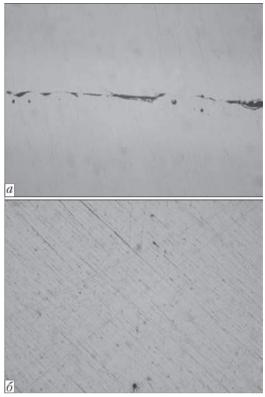


Рис. 2. Структура нетравленых образцов после АВП меди $\times 200$: a — припой Л63; δ — припой БрБ2

азотной кислоты. На образце с припоем Л63 (рис. 3, *a*) имеются общие зерна шва с основным металлом и восстановительным слоем. Толщина слоя припоя составляет примерно 250 мкм, микротвердость 740...800 МПа. На образце, паяном припо-

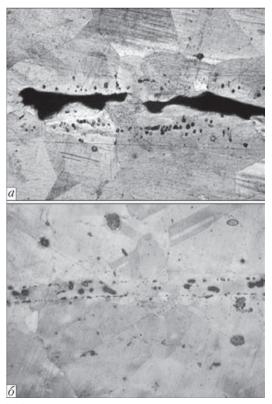


Рис. 3. Структуры соединений меди, полученных методом АВП $\times 200$: a — припой Л63; δ —припой БрБ2

ем БрБ2 (рис. 3, б), наблюдали слой припоя толщиной 90 мкм, имеющий на отдельных участках общие зерна с основным металлом. С обеих сторон шва, а также в самом шве наблюдаются неметаллические включения округлой формы размерами 5...60 мкм. Микротвердость слоя припоя составляет 1080 МПа, а основного металла и восстановительного слоя 740 МПа. Плавное изменение микротвердости наблюдается на расстоянии до 350 мкм по обе стороны шва. Такое изменение микротвердости можно объяснить диффузией бериллия из припоя вглубь меди. Основной металл и восстановительный слой всех образцов имеют структуру характерную для отожженной меди.

Полученные при металлографических исследованиях сведения о структуре и размерах слоя припоя и диффузионных зон можно использовать для определения их термического сопротивления и оценить его вклад в коэффициент теплопередачи от расплавленного металла к охлаждающей воде через многослойную стенку кристаллизатора. Термическое сопротивление такой стенки R_{Σ} состоит из суммы сопротивлений входящих в нее слоев, каждое из которых определяется частным от деления толщины слоя d (м) на коэффициент теплопроводности его материала λ (Bt/(м·°C)). Применительно к медной стенке кристаллизатора, восстановленной пайкой, величина термического сопротивления определяется следующим выражением:

$$R_{\Sigma}=R_{_{
m M}}+R_{_{
m III}}+R_{_3}=d_{_{
m M}}/\lambda_{_{
m M}}+d_{_{
m III}}/\lambda_{_{
m III}}+d_{_3}/\lambda_{_3}$$
 (°C·м²/Вт), где $R_{_{
m M}}$, $R_{_{
m III}}$, $R_{_{
m M}}$, $R_{_{
m III}}$, — соответственно суммарное термическое сопротивление всех слоев; $\lambda_{_{
m M}}=393$ Вт/(м·°С); коэффициент теплопроводности слоя припоя равен для Л63 $\lambda=105$, для БрБ2 $\lambda=352$ Вт/(м·°С); $R_{_3}$ — суммарное термическое сопротивление диффузионных зон, коэффициент теплопроводности которых может быть принят средним между таковыми меди и припоя [9].

Коэффициенты теплопроводности материалов, использованных нами в качестве припоев, являются величинами одного порядка с коэффициентом теплопроводности меди. В то же время толщины слоя припоя и диффузионных зон, измеряемые в десятках или сотнях микрон, на два-три порядка меньше суммарной толщины медных слоев, измеряемых в десятках миллиметров. Таким образом, термические сопротивления прослойки припоя и диффузионных зон будут на те же дватри порядка меньше, чем сопротивление медных слоев. Поэтому при расчете термического сопротивления восстановленной медной стенки кристаллизатора можно не учитывать дополнительное сопротивление, создаваемое бездефектным паяным соединением, полученным методом АВП.

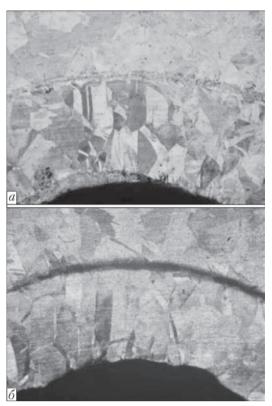


Рис. 4. Микрошлифы мест гиба паяных образцов ×25: a — припой Л63; δ — припой БрБ2

В то же время дефекты в прослойке припоя в виде пор, трещин и особенно непропаев, могут создавать определенные помехи тепловому потоку через многослойную стенку. При концентрации подобных дефектов на локальном участке паяного соединения может произойти заметное снижение теплоотвода от восстановительного слоя и, как следствие, повышение его температуры в этом месте. При определенной величине теплового потока от расплавленного металла к многослойной стенке кристаллизатора рост температуры восстановительного слоя может привести к его деформации в этом месте и даже отрыву от основного металла. Таким образом, при восстановительном ремонте медных стенок кристаллизаторов необходимо технологически обеспечивать бездефектную пайку.

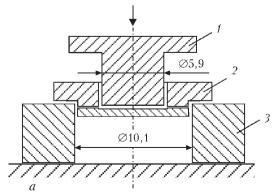
В процессе работы кристаллизатора с отремонтированными методом АВП медными стенками паяный шов, соединяющий основной металл и восстановительный слой, должен иметь прочность, предотвращающую отслоение последнего при воздействии усилий сдвига и изгиба. Кроме того, для уменьшения истирания поверхность восстановительного слоя должна иметь твердость близкую к твердости медной поверхности до ремонта. Образцы испытывали на отрыв восстановительного слоя и изгиб паяного соединения, а также измеряли микротвердость поверхности восстановительного слоя после пайки.

Для испытания на изгиб по всей толщине паяного соединения вырезали специальные образцы размером 80×10 мм, которые загибали на угол 90° восстановительным слоем вовнутрь. Отслоений восстановительного слоя от основного металла на образцах с использованием припоев Л63 и БрБ2 не обнаружено (рис. 4).

Механические свойства полученных паяных соединений оценивали по пределу прочности на отрыв между слоями. Подобные испытания не регламентированы ГОСТами, поэтому их проводили по схеме, представленной на рис. 5, a, на образцах, размеры которых указанны на рис. 5, δ [10].

Для проверки и сравнения результатов, полученных по указанной схеме, были испытаны монолитные образцы таких же размеров, изготовленные из того же листа меди, который был использован для пайки. Предел прочности на разрыв монолитного образца составил 450 МПа, что соответствует пределу прочности при растяжении деформированной меди М1 [11]. Таким образом, принятую нами схему испытаний можно считать приемлемой.

Среднее значение предела прочности на отрыв образцов паяных латунью Л63 составило 240 МПа, а образцов паяных бронзой БрБ2 — 530 МПа. Более низкое значение предела прочности на отрыв образцов паяных латунью Л63 по сравнению с монолитными образцами объясняются наличием пор в паяном шве. В то же вре-



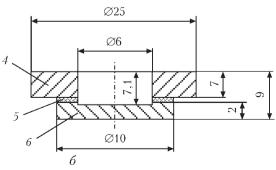


Рис. 5. Схема испытаний (a) образца паяного соединения (δ) на отрыв: I — пуансон; 2 — образец; 3 — матрица; 4 — основной металл; 5 — паяный шов; δ — восстановительный слой

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

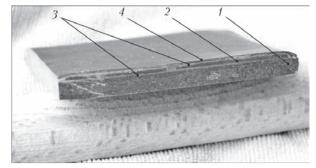


Рис. 6. Многослойное соединение, полученное за один нагрев методом АВП: I — основной слой; 2 — восстановительный слой; 3 — паяные швы; 4 — износостойкое покрытие

мя более высокие значения предела прочности на отрыв, полученные при пайке меди бронзой БрБ2 могут быть объяснены отсутствием дефектов в паяном соединении, имеющем общие зерна с медью, а также наличием в меди диффузионной зоны, упрочненной бериллием.

Анализируя результаты металлографических исследований, механических испытаний и оценивания величин термической прослойки припоев можно рекомендовать для восстановительного ремонта методом АВП плоских панелей кристаллизаторов МНЛЗ припой из бериллиевой бронзы БрБ2 в виде фольги.

В связи с изменением структуры меди при нагреве для пайки определяли твердость основного металла и восстановительного слоя до и после АВП. Первоначальные значения твердости меди находились в пределах 579...606 МПа, что соответствует твердости деформированной и отожженной меди [11]. После АВП твердость меди снизилась незначительно до 530...550 МПа.

Стойкость кристаллизаторов МНЛЗ, состоящих из плоских медных панелей, зачастую не превышает 100 плавок [2], а стойкость кристаллизаторов с защитным покрытием — тонким слоем из материала, имеющего более высокую твердость, увеличивается в 10 раз [12]. В связи с этим желательно нанесение защитного покрытия на поверхность меди, обращенной внутрь кристаллизатора. Таким покрытием может служить тонкий нержавеющий лист, припаянный к восстановительному слою меди. Предварительный опыт (рис. 6) показывает возможность получения за один нагрев такого многослойного паяного соединения, включающего восстановительный слой из меди и

52

износостойкое покрытие из тонкого нержавеющего писта

Выводы

Экспериментально показано, что метод АВП может быть применен для получения качественного соединения медных листов большой площади по плоскости и имеет перспективу при ремонте панелей кристаллизаторов МНЛЗ. Бездефектные паяные соединения с высокими механическими характеристиками получены путем АВП с использованием в качестве припоя фольги бронзы БрБ2. В связи с малой толщиной прослойки и высокой теплопроводностью припоя, при тепловом расчете кристаллизатора его термическим сопротивлением можно пренебречь. Экспериментально показана возможность нанесения защитного покрытия одновременно с нанесением восстановительного слоя при ремонте кристаллизатора.

- 1. *Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н.* Непрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1984. 198 с.
- 2. *Радиальный* слябовый кристаллизатор со щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / А.А. Маркушин, А.В. Куклев, Ю.М. Айзин и др. // М.: Металлург, 2005. С. 38–41.
- 3. *Абрамович В.Р.* Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. М.: Машиностроение, 1988. 121 с.
- Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ способом наплавки трением с перемешиванием / Ю.Н. Никитюк, Г.М. Григоренко, В.И. Зеленин и др. // Современ. электрометаллургия. 2013. № 3. С. 51–55.
- 5. *Пузрин Л.Г., Бойко Г.А., Атрошенко М.Г.* Автовакуумная высокотемпературная пайка. Киев: Об-во «Знание» УССР, 1975. С. 18.
- Автовакуумная пайка особо толстостенных сосудов массой до ста тонн / Л.Г. Пузрин, М.Г. Атрошенко, И.Г. Пещерин и др. // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1984. – С. 76–77.
- 7. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины.
- Справочник по пайке / Под ред. С.Н. Лоцманова, И.Е. Петрунина, В.П. Фролова. М.: Машиностроение, 1975. 407 с.
- 9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979. С. 212.
- 10. *Мардян М.Г., Рябчиков Е.А., Эпштейн Г.Н.* Методика определения прочности сцепления слоев биметалла // Заводская лаборатория. 1979. № 8. С. 757–759.
- 11. *Келоглу Ю.П., Захариевич К.М., Карташевская М.А.* Металлы и сплавы. Справочник. Кишинев, 1977. 264 с.
- Масато Т. Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали от «Маshima Kosan» // Междунар. науч.-практ. семинар: Электроплакирование и термическое напыление. – Екатеринбург, 2009. – С. 1–19.

Поступила в редакцию 16.04.2015





ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СТАНИН ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКОЙ ПЛАВЯЩИМСЯ МУНДШТУКОМ

К.П. ШАПОВАЛОВ¹, В.А. БЕЛИНСКИЙ¹, С.Н. КОСИНОВ¹, С.Н. ЛИТВИНЕНКО¹, К.А. ЮЩЕНКО², И.И. ЛЫЧКО², С.М. КОЗУЛИН²

¹ ПАО «НКМЗ». 84305, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Орджоникидзе, 4 ² ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail:office@paton.kiev.ua

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины в содружестве с Новокраматорским металлургическим заводом постоянно совершенствует технологию электрошлаковой сварки. В представленной работе описана технология электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком при изготовлении крупногабаритных станин со стыками сечением $420...460 \times 2200...2380$ и $940...1120 \times 1040...1250$ мм. Достигнуто сокращение машинного времени почти в 2 раза. Сварные соединения литосварных крупногабаритных заготовок станин мощных прокатных станов характеризуются высоким качеством. Библиогр. 8, рис. 5.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, плавящийся мундитук, крупногабаритные станины; подогрев; промежуточный отпуск, сокращение машинного времени

Электрошлаковая сварка (ЭШС) крупногабаритных металлических заготовок является наиболее эффективным и широко применяемым сварочным процессом при изготовлении несущих элементов мощных машин и агрегатов горнодобывающего, металлургического и других видов тяжелого машиностроения [1]. Первые примеры изготовления подобных металлоконструкций типа станин в литосварном варианте были успешно выполнены уже в начале внедрения ЭШС на Новокраматорском машиностроительном заводе (НКМЗ) [2]. Станина окалиноломателя была изготовлена из четырех элементов (сталь Ст25Л, толщина свариваемых кромок 470 мм), соединенных между собой ЭШС проволочными электродами. Стыки сваривали одним многоэлектродным аппаратом типа А-395 в определенной последовательности. После сварки станина подвергалась общей высокотемпературной обработке (ВТО) (нормализация с отпуском). В дальнейшем технология и техника изготовления металлоконструкций подобного типа совершенствовалась в направлениях применения способа ЭШС плавящимся мундштуком (ПМ) и метода дозированного противодействия сварочным деформациям [3, 4].

В сварочном производстве ПАО «НКМЗ» высокий технический уровень изготовления литосварных или прокатносварных массивных деталей обеспечивается, прежде всего, наличием современного сварочного оборудования и необходимой технологической оснастки [5, 6], а также применением высокоэффективных технологиче-

ских приемов, разработанных на основе исследований электрошлакового процесса [7].

Конструктивно сварные станины имеют О-образную форму, состоящую из отдельных элементов, соединяемых между собой преимущественно ЭШС ПМ. Станину массой 50...62 т, состоящую из двух элементов, сваривали одним общим швом по схеме, представленной на рис. 1. Сварку станин массой 205...270 т, состоящих из четырех элементов, принято выполнять в два приема — по два симметрично расположенных стыка одновременно (рис. 2).

Техническая оснащенность сборочно-сварочного участка и творческое совершенствование ранее разработанных технологических приемов при реализации конкретных технологий ЭШС ПМ применительно к заводским условиям и номенклатуре выпускаемой продукции позволили организовать эффективное производство сварных металлоконструкций подобного рода.

Современная технология и техника ЭШС ПМ литосварных станин различных модификаций клетей прокатных станов успешно реализована на участке ЭШС больших толщин им. Г.З. Волошкевича при изготовлении прокатного оборудования в рамках ряда масштабных проектов по реконструкции толстолистовых станов «2800» Алчевского, «2850» Ашинского, «2500» Магнитогорского меткомбинатов и строительства стана «4300» в индийском городе Роуркела.

Гарантия протекания электрошлакового процесса без вынужденных остановок, непрерывный мониторинг основных параметров режима

© К.П. Шаповалов, В.А. Белинский, С.Н. Косинов, С.Н. Литвиненко, К.А. Ющенко, И.И. Лычко, С.М. Козулин, 2015

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

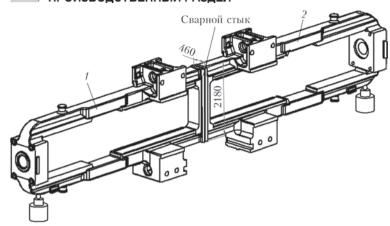


Рис. 1. Схема сборки элементов станины под сварку одним швом: I — левый, 2 — правый

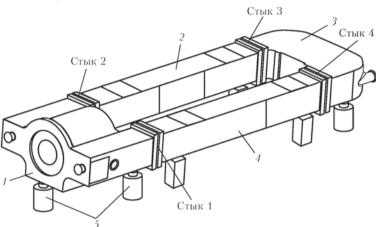


Рис. 2. Схема сборки элементов станины с четырьмя швами: 1 — нижняя часть; 2, 4 — средние вставки; 3 — верхняя часть; 5 — опоры

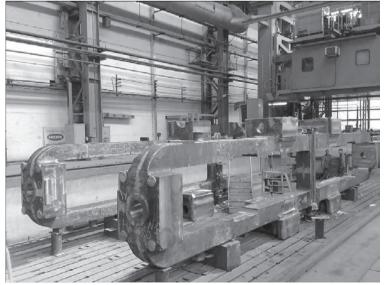


Рис. 3. Одновременная сварка двух станин по схеме рис. 1. Рабочий момент

сварки и последующей ВТО обеспечивают металлу сварного соединения требуемое качество, а точный учет ожидаемых деформаций позволяет получать высокую точность геометрических размеров конструкции станины после сварки, а значит — минимальные припуски на окончательную механическую обработку. Постоянный мони-

торинг режимов сварки свидетельствует о высокой надежности поддержания и контроле выбранных параметров: не зафиксировано ни одного случая вынужденной остановки сварочного процесса. Перемещение свариваемых элементов определяли по замерам расстояния между кернами, нанесенными на базе сверху и снизу стыков на 200 мм по обеим сторонам. По результатам ультразвукового контроля (УЗК) металла сварных соединений, проведенного после ВТО, все станины были признаны годными для дальнейшего передела.

Благодаря уникальным техническим характеристикам установки для ЭШС ПМ больших толщин [5, 6] стало возможным выполнять сварку стыков двух отдельных станин (рис. 3) по схеме рис. 1 и двух стыков одной станины (рис. 4) по схеме рис. 2 одновременно и тем самым сократить машинное время сварки практически в два раза. Всего было изготовлено четыре станины по схеме рис. 1 (стыки сечением 420...460×2200...2380 мм) и 14 станин по схеме рис. 2 (стыки 940...1120×1040...1250 мм). Продолжительность сборочно-сварочных операций для варианта станины с одним швом (рис. 1) составила 4 суток и 6 суток для станины с четырьмя швами (рис. 2).

В последние годы некоторые специалисты иногда ставят под сомнение приоритетность использования ЭШС при изготовлении металлоконструкций большой толщины, ссылаясь на другие способы сварки, как, например, автоматическая электродуговая сварка (ЭДС) в узкий зазор или электронно-лучевая сварка. Действительно, этими способами можно сваривать довольно большие толщины, но применяют их пока чаще всего, как исключение.

Для сравнения приведем некоторые данные по изготовлению станины прокатного стана «5000» с применением автоматической ЭДС в узкий зазор. Элементы станины соединяли шестью швами: а) четыре шва сечением стыка 1060х1060 мм; б) два шва сечени-

ем 1060х1330 мм) [8]. Форма стыков и последовательность заполнения сварных швов показаны на рис. 5. Заварку четырех швов (а) осуществляли одновременно 4-мя сварочными аппаратами фирмы «ESAB», затем выполняли заварку двух

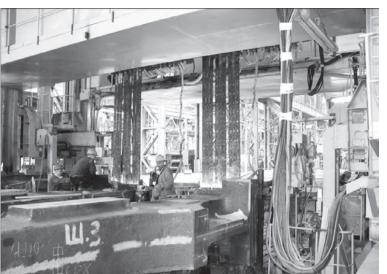
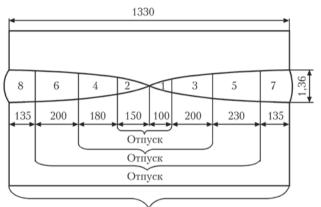


Рис. 4. Электрошлаковая сварка двух швов по схеме рис. 2. Рабочий момент



Отпуск, контроль, нормализация + отпуск

Рис. 5. Последовательность заполнения разделки стыка и проведения термообработки сварных швов при изготовлении станины с применением автоматической сварки под флюсом [8]

швов (б). Технология заполнения стыков сварочной проволокой предусматривала: предварительный и сопутствующий подогрев каждого стыка до 150...200 °С (при ЭШС только нагрев начала стыка); последовательное наложение швов отдельных участков зазора; кантовка станины для заполнения противоположного участка; промежуточный отпуск каждых двух противоположных участков (рис. 5) при температуре 580...600 °С. При выполнении швов использовали: специаль-

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ный кантователь большой грузоподъемности, устройства для предварительного и сопутствующего подогрева; другие элементы оснастки по обеспечению геометрических параметров станины, немедленный промежуточный отпуск после выполнения каждых двух противоположных участков. Технология автоматической ЭДС в узкий зазор не имеет преимуществ перед ЭШС ни по одному параметру производственного цикла изготовления. Например, количество наплавленного металла для шести швов составляет свыше 7000 кг (при ЭШС -2300 кг), а машинное время сварки вообще не сопоставимо.

Таким образом, техника и технология производства литосварных крупногабаритных заготовок станин мощных прокатных станов, базирующаяся на на-

учно-обоснованном использовании приемов электрошлковой сварки плавящимся мундштуком, позволяет заводу производить высокоэффективную конкурентоспособную продукцию.

- 1. Электрошлаковая сварка и наплавка/ Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1980. 511 с.
- 2. Стеренбоген Ю.А., Погорелов В.С. Электрошлаковая сварка станин окалиноломателя // Автомат. сварка. $1956.- \mathbb{N} 24.- \mathbb{C}.108-114.$
- 3. Электрошлаковая сварка. Итоги, проблемы и перспективы развития / Б.Е. Патон, Д.А. Дудко, К.А. Ющенко и др. // Там же. 1987. № 5. С 32-42.
- Получение точных размеров крупногабаритных станин при электрошлаковой сварке / И.И. Сущук-Слюсаренко, И.И. Лычко, И.М. Коваль и др. // Там же. –1968. – № 11. – С. 55–58.
- Новая установка для электрошлаковой сварки крупных элементов на АО «Ново-Краматорский машиностроительный завод» / В.А. Невидомский, С.Г. Красильников, А.Д. Панин и др. // Там же. – 2002. – № 2. – С. 50–52.
- Системы управления процессом и мониторинг режимов важные факторы обеспечения качества при электрошлаковой сварке металла большой толщины / С.Н. Литвиненко, К.П. Шаповалов, И.С. Савченко и др. // Там же . 2013. № 12. С. 41–44.
- Yushchenko K.A., Lychko I.I., Sushchuk-Slyusarenko I.I. Effective Techniques of Electroslag Welding and Prospects for their Application in Welding Producyion // Welding and Surfacing Reviews. – 1999. – Vol. 12. – P. 1–108.
- Автоматическая сварка под слоем флюса элементов конструкций сверхбольшой толщины / Г.П. Карзов, С.Н. Галяткин, А.Я. Варовин и др. // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3. – С. 357–371.

Поступила в редакцию 28.05.2015



УДК 621.791:613.6

ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМА ПРИ СВАРКЕ В АРГОНОСОДЕРЖАЩИХ ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

О.Г. ЛЕВЧЕНКО 1 , В.А. КУЛЕШОВ 1 , А.Ю. АРЛАМОВ 2

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua ²НТУУ «Киевский политехнический институт», 03056, г. Киев, ул. Дашавская, 6/2

Избыточный шум, превышающий предельно допустимый уровень, присущ многим сварочным процессам. Среди способов сварки плавлением, выделяющихся в этом отношении, можно отметить газовую, лазерную, плазменную и электродуговую сварку. Цель данной работы заключалась в измерении характеристик акустического шума на рабочем месте при ручной сварке неплавящимся электродом в аргоне и полуавтоматической сварке в среде защитного газа Ar + CO₂. Сварку проводили в сварочной металлической кабине высотой 1,8 м, шириной 2,0 м и глубиной 2,4 м. Параметры шума измеряли интегрирующим шумомером первого класса точности. Точка измерения на рабочем месте сварщика находилась на расстоянии 0,55 м от сварочной дуги. Одиночное измерение проводилось в течение примерно 60 с при работающей вентиляционной установке. Свариваемые стальные пластины (Ст3) толщиной 12 мм располагались на сварочном столе и сваривались в аргоновом газе вольфрамовым электродом диаметром 2,4 мм. Полуавтоматическую сварку стальных пластин (Ст3) толщиной 4 мм проводили в смеси 82 % Аг и 18 % СО, омедненной сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Установлено, что при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом значение эквивалентного уровня звука на рабочем месте сварщика в широком диапазоне номинальных значений силы тока I = 45...210 A не превышает 64 дБA, что значительно меньше установленной санитарно-гигиенической нормы 80 дБА, и сравним с уровнем фонового шума 57 дБА. При полуавтоматической сварке в среде защитного газа Ar + CO₂ значение эквивалентного уровня звука на рабочем месте сварщика в диапазоне номинальных значений силы тока I== 80...250 А превышает ПДУ и достигает величины 96 дБА. Наблюдаются две качественно отличные друг от друга области зависимости уровня шума от силы сварочного тока. При слабых токах в диапазоне значений 80...150 А шум усиливается, однако дальнейшее увеличение силы тока приводит к ослаблению шума из-за возникновения эффекта «погружённой дуги». В области роста отмечается близкая к линейной зависимость уровня шума от сварочного тока, но при этом усиление шума незначительное — примерно на 11 % при увеличении силы тока в два раза. Установлена граница безопасной по шуму рабочей зоны на расстоянии 2 м от места сварки. Данные настоящей работы могут быть использованы при санитарно-гигиенической оценке шумовых эпизодов конкретных процессов сварки в защитных газах. Библиогр. 6, табл. 5, рис. 5.

Kл ю ч e в ы e с л о в a: сварка в защитном газе, аргон, смесь $Ar + CO_2$, акустический шум, характеристики

В данной статье, являющейся продолжением работы [1], представлены результаты исследований характеристик шума на рабочем месте сварщика при сварке в защитных газах: при ручной сварке неплавящимся электродом и полуавтоматической сварке.

Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Сварку проводили аппаратом аргонодуговой сварки на постоянном токе Master 2200 фирмы «Кетррі ОУ» (Финляндия) в сварочной металлической кабине высотой 1,8 м, шириной 2 м и глубиной 2,4 м. Свариваемые стальные пластины (Ст3) толщиной 12 мм располагались на сварочном столе и сваривались в защитном аргоновом газе вольфрамовым электродом диаметром 2,4 мм.

Параметры шума измеряли интегрирующим измерителем уровня звука (модель 2230) фирмы «Вrüel & Kjær» первого класса точности, функциональные и технические характеристики которого соответствуют требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 17187–2010 «Шумомеры.

Часть 1. Технические требования» [2]. Точка измерения находилась на расстоянии вытянутой руки (0,55 м) от сварочной дуги.

Измерения шума на типичном рабочем месте проводили в соответствии с требованиями ДСН 3.3.6.037–99 «Санитарные нормы производственного шума, ультразвука и инфразвука» [3]. При всех измерениях регистрировали уровни шума с частотной коррекцией A (общий уровень шума), необходимые для проведения санитарно-гигиенической оценки: эквивалентный уровень звука $L_{\rm eq}$, максимальный $(L_{\rm p})_{\rm max}$ и минимальный $(L_{\rm p})_{\rm min}$ уровни звукового давления.

Одиночное измерение проводили в течение примерно 60 с при работающей вентиляционной установке. Характеристики фонового шума $L_{\rm фон}$, производимого вспомогательным оборудованием (генератором тока, вентиляционной установкой) и другими источниками шума, находящимися в сварочном цеху, следующие: $L_{\rm eq} = 56,5$ дБА; $(L_{\rm p})_{\rm max} = 72,7$ дБА; $(L_{\rm p})_{\rm min} = 53,3$ дБА.

© О.Г. Левченко, В.А. Кулешов, А. Ю. Арламов, 2015



Т а б л и ц а $\ 1$. Измеренный уровень шума $L_{\mbox{\tiny H3M}}$ на рабочем месте сварщика

I _{cB} , A	$L_{ m eq}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm max}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm min}$, дБА
45	59,6	71,6	54,9
100	60,2	65,4	57,2
150	63,1	68,2	57,5
210	65,9	80,0	57,2

Данные о величинах шума, генерируемых при сварке на рабочем месте сварщика в диапазоне номинальных значений сварочного тока 45...210 A, приведены в табл. 1.

Определим величину шума $L_{\rm cB}$, генерируемого непосредственно сварочным процессом. Величина измеряемого шума $L_{\rm изм}$ состоит из двух частей: фонового $L_{\rm фон}$ и сварочного шума $L_{\rm cB}$. Используя принцип аддитивности шумовых энергетических потоков (интенсивностей) в точке измерения, можно показать [4], что величина $L_{\rm cB}$ определяется выражением

$$L_{_{\mathrm{CB}}} = L_{_{\mathrm{фоH}}} + 10 \, \mathrm{lg} (10^{(L_{_{\mathrm{H3M}}} - L_{_{\mathrm{фоH}}})/10} - 1).$$
 (1)

Откуда следует, что если величина измеряемого шума $L_{_{\rm ИЗМ}}$ значительно больше величины фонового шума, так как разность $L_{_{\rm ИЗМ}}-L_{_{\rm фон}}\geq 10$, то с высокой степенью точности (в пределах погрешности измерений \pm 1 дБ) можно считать, что $L_{_{\rm ИЗМ}}\approx L_{_{\rm CB}}$. Поскольку в данном случае это условие не выполняется, вычислим величину $L_{_{\rm CB}}$ по формуле (1), используя данные табл. 1. Уровень шума $L_{_{\rm CB}}$ на рабочем месте сварщика при $I_{_{\rm CB}}=45$ A соответствует 56,7 дБА; при 100 A — 57,8 дБА; 150 A — 62,0 дБА; 210 A — 65,4 дБА.

Графически значения $L_{\rm eq}$ приведены на рис. 1. Видно, что шум, производимый сварочным процессом, значительно ниже установленного предельно допустимого уровня (ПДУ), равного 80 дБА [3]. Шум закономерно снижается при уменьшении силы тока, так как энерговыделение в воздухе при этом также падает.

Зафиксировано незначительное изменение уровня шума в довольно большом диапазоне изменений номинальных значений силы тока: рост силы тока

Таблица 2. Измеренный уровень шума $L_{\rm изм}$ и расчетные величины сварочного шума $L_{\rm cB}$ на рабочем месте сварщика

, A	$L_{_{ m H3M}}$			$L_{_{\mathrm{CB}}}$
$I_{\rm cb}, A$	$L_{ m eq}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm max}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm min}$, дБА	$L_{ m eq}$, дБА
80	84,9	91,9	75,6	84,7
107	88,7	93,6	81,6	88,6
110	91,5	96,0	84,2	91,5
125	90,2	95,6	85,6	90,1
133	93,6	96,5	88,6	93,6
150	95,5	98,6	81,8	95,5
175	93,1	97,4	78,0	93,1
200	92,4	97,1	76,2	92,4
250	94,2	98,0	75,6	94,2

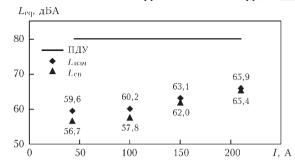


Рис. 1. Зависимость уровней шума $L_{\mbox{\tiny H3M}}$ и $L_{\mbox{\tiny CB}}$ на рабочем месте сварщика от силы сварочного тока I

в 4,7 раза вызвал усиление шума только на 12 %. Вклад фонового шума в общую генерацию шума возрастает при снижении силы сварочного тока и сравним с величиной сварочного шума. Таким образом, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом не требует проведения защитных противошумовых мероприятий.

Полуавтоматическая сварка в среде защитного газа Ar + CO₂. Полуавтоматическую сварку стальных пластин (Ст3) толщиной 4 мм проводили в смеси 82 % Ar и 18 % CO₂ омедненной сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. При сварке использовали источник питания сварочный инвертор Invertec V350-PRO фирмы «Lincoln Electric» (США). Оборудование для подачи проволоки — LF-72 фирмы «Lincoln Electric».

Условия сварки и методика измерений были аналогичны предыдущему случаю. Данные измерений величин $L_{\rm изм}$ и $L_{\rm cв}$ приведены в табл. 2. Уровень фонового шума $L_{\rm фон}$ на рабочем месте сварщика следующий: $L_{\rm eq}=71,1$ дБА; $(L_{\rm p})_{\rm max}=84,7$ дБА; $(L_{\rm p})_{\rm min}=64,1$ дБА.

Графически данные измерения величин приведены на рис. 2.

Результаты измерений показывают значительное превышение величины ПДУ, особенно, на интенсивных режимах сварки. При этом наблюдаются две области зависимости уровня шума от силы сварочного тока, качественно отличающиеся друг от друга. При слабых токах в диапазоне значений 80...150 А шум усиливается, но при дальнейшем росте сварочного тока уровень шума падает. Это объясняется снижением уровня акустического излучения из-за уменьшения длины дуги, наблюдаемого на больших зна-

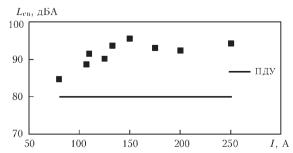


Рис. 2. Уровень сварочного шума на рабочем месте при полуавтоматической сварке в смеси ${\rm Ar} + {\rm CO}_2$

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

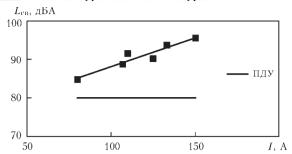


Рис. 3. Уровень сварочного шума на рабочем месте при полуавтоматической сварке в среде защитного газа ${\rm Ar} + {\rm CO}_2$ в линейной области роста шума

Т а б л и ц а $\,$ 3 . $\,$ $L_{_{\rm H3M}}$ на расстоянии $\,$ 1 м от сварочной дуги

7 A	$L_{_{ m H3M}}$					
I_{CB}, A	$L_{ m eq}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm max}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm min}$, дБА			
80	83,3	92,9	74,6			
107	84,8	92,0	81,7			
125	85,7	92,0	84,7			
133	86,1	92,7	85,2			

Таблица 4. $L_{\text{изм}}$ на расстоянии 1,5 м от дуги

I A	$L_{_{ m H3M}}$					
I_{CB}, A	$L_{ m eq}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm max}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm min}$, дБА			
80	81,3	90,8	72,0			
107	81,9	91,4	71,7			
125	82,3	91,7	72,4			
133	82,2	91,6	72,9			

Таблица 5. $L_{\text{изм}}$ на расстоянии 2,0 м от дуги

, A	$L_{_{ m H3M}}$					
$I_{\rm cB}, A$	$L_{ m eq}$, дБА	$(L_{\rm p})_{\rm max}$, дБА	$(L_{ m p})_{ m min}$, дБА			
80	78,1	87,5	70,8			
107	78,6	87,9	70,5			
125	79,1	88,1	71,4			
133	79,0	88,0	71,8			

чениях тока во время осуществления режима сварки «погруженной дугой» [5].

Отметим линейный характер зависимости в области роста уровня шума, на что указывает достаточно высокое значение квадрата величины линейной корреляции $R^2 = 0.90$ (рис. 3). В указанном диапазоне фиксируется незначительное усиление шума примерно на 11 % при увеличении силы тока вдвое.

Для определения безопасной по уровню шума рабочей зоны для вспомогательного персонала были проведены измерения уровня шума на различном удалении от источника шума. Данные измерений уровней шума $L_{\rm изм}$ на расстоянии от сварочной дуги, равном 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м представлены в табл. 3–5.

Используя средства анализа данных MS Excel, можно показать, что полученные данные хорошо аппроксимируются линейными зависимостями, что подтверждают достаточно высокие значения квадрата линейной корреляции \mathbb{R}^2 , лежащие в ди-

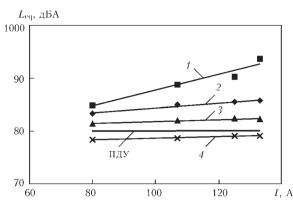


Рис. 4. Уровни измеренного шума при полуавтоматической сварке в среде защитного газа на расстояниях 0,55 (I), 1,0 (2), 1,5 (3) и 2,0 м (4)

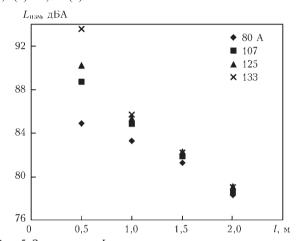


Рис. 5. Зависимость $L_{\mbox{\tiny H3M}}$ от расстояния при различных значениях силы тока

апазоне 0,92...0,97. Отметим, что линейная зависимость между уровнем шума и значением сварочного тока характерна также при ручной дуговой сварке покрытыми электродами [1]. Графически данные измерений и их линейные тренды изображены на рис. 4. С удалением от места сварки уровень шума снижается и уже на расстоянии 2 м его величина становится ниже ПДУ. Таким образом, граница безопасной по шуму рабочей зоны находится в промежутке расстояний от сварочной дуги 1,5...2,0 м.

На больших расстояниях от источника шума измеренные величины уровней шума слабо зависят от режима сварки и, в принципе, из-за рассеяния звуковых волн уровень шума снижается до фонового уровня (рис. 5).

Поскольку уровень производимого шума на рабочем месте значительно превышает ПДУ, необходимо применять защитные противошумовые мероприятия для снижения воздействия шума на сварщика [6], например, снабжая его соответствующими средствами индивидуальной защиты или сокращая время работы согласно [3]. Отметим также, что для персонала, находящегося вблизи места проведения таких сварочных работ (но не ближе двух метров), защита не требуется.

- ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Выводы

- 1. При ручной аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом в защитном газе уровень шума на рабочем месте сварщика в широком диапазоне номинальных значений сварочного тока (45...210 A) не превышает 64 дБА, что значительно меньше установленной санитарно-гигиенической нормы (ПДУ = 80 дБА), и сравним с уровнем фонового шума 57 дБА.
- 2. При полуавтоматической сварке в среде защитного газа $Ar + CO_2$ уровень шума на рабочем месте сварщика в диапазоне номинальных величин силы тока (80...250 A) превышает ПДУ и достигает 96 дБА. С увеличением сварочного тока от 80 до150 A шум усиливается, а дальнейшее

увеличение тока приводит к ослаблению шума вследствие погружения дуги в сварочную ванну. Безопасная по шуму рабочая зона находится на расстоянии 1,5...2,0 м от сварочной дуги.

- 1. Левченко О.Г., Кулешов В.А., Арламов А.Ю. Санитарно-гигиеническая оценка шума при ручной дуговой сварке покрытыми электродами // Автомат. сварка. $2014 N_{\rm P} 9 {\rm c.} 47-50$.
- 2. ГОСТ 17187–2010. Шумомеры. Ч. 1: Технические требования. Введ. 01.07.2012.
- 3. ДСН 3.3.6.037–99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Введ. 01.12.1999.
- 4. *Грінченко В.Т., Вовк Ш.В., Маципура В.Т.* Основи акустики. Київ: Наук. думка, 2007. 640 с.
- Теория сварочных процессов / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 560 с
- Левченко О.Г., Кулешов В.А. Производственный шум. Ч. 3 // Сварщик. – 2013. – № 4 – С. 34–39.

Поступила в редакцию 13.05.2015

Международный симпозиум к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

7-10 июня 2016 г., Киев, Украина

Тематика симпозиума

- ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование;
- электрошлаковое литье;
- сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов;
- теория кристаллизации сталей и сплавов;
- управление затвердеванием в металлургии и сварке;
- крупные кузнечные и листовые слитки;
- моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки;
- современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков;
- родственные области металлургии, сварки и металловедения.

Организационный комитет

Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81. Тел./факс: +38(044) 337-30-82 E-mail:org@medovar100.org, info@medovar100.org Дополнительная информация на сайте симпозиума www.medovar100.org

Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»

13–15 июня 2016 г. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Тематика конференции:

- ♦ ЭЛС
- лазерная сварка
- ♦ гибридные процессы сварки
- ♦ STIR

9/2015

- ♦ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ♦ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D адитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

59

http://pwi-scientists.com/rus/modernweld2016

ПОДПИСКА 2016 — на журнал «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

Укра	ина	Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие на год		на полугодие	на год
720 грн. 1440 грн. 3600 руб. 7200 руб. 90 дол. СЦ				90 дол. США	180 дол. США
В стоимость подписки включена стоимость доставки заказной бандеролью.					

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).











Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайте: http://www.patonpublishinghouse.com
В открытом доступе выпуски журнала с 2009 по 2013 гг. в формате *.pdf.

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНИТИ РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnistwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Volding Technology».

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
- Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
- Вклейка A4 (200×290 мм) 340\$
- Разворот АЗ (400×290 мм) 500\$
- 0,5 A4 (185×130 мм) 170\$

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрези 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате ІВМ РС
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 10.09.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22 + 1 цв. вклейка. Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84 E-mail: journal@paton.kiev.ua www.patonpublishinghouse.com

© Автоматическая сварка, 2015



Идеальный сварной шов возможен. TPS/i Robotics — вершина Интеллектуальной Революции*

Компания ООО «Фрониус Украина» для решения различных сварочных задач представляет на украинском рынке принципиально новую сварочную платформу TPS/i Robotics, которая взаимодействует с пользователем на интеллектуальном уровне и оказывает надежную поддержку при настройке параметров, выборе подходящих опций и гарантирует непревзойденные возможности для дуговой сварки.

Система TPS/і для полуавтоматической сварки стала воплощением Intelligent Revolution в 2013–2014 годах. Благодаря этой инновационной технологии влияние внешних факторов и других источников ошибок значительно снижено. Результатом стала совершенно новая сварочная система с безоговорочным превосходством в области качества и повторяемости результатов. Новая система характеризуется такими показателями, как высочайшее качество сварного шва, чрезвычайно низкий уровень брака, энергоэффективность и простота в обслуживании, благодаря которой простои сводятся к минимуму.

TPS/i Robotics — это веха в автоматизированном сварочном производстве. Каждый автоматизированный процесс сварки начинается с правильного программирования параметров процесса и системы управления роботом. Даже малейшие неточности могут вызвать значительное снижение качества. что, в свою очередь, приводит к повышению расходов на гарантийное обслуживание, особенно в автомобилестроении. Автоматические процессы сварки предоставляют очевидные преимущества — возможность установки уровня качества, затрат и длительности процессов, а также высокую степень воспроизводимости результатов. Множество внешних факторов могут повысить уровень брака или длительность простоев и, как следствие, снизить общую прибыльность производства. Если неполадку не выявить и не устранить немедленно, она будет повторяться снова и снова. Сложность заключается в том, что роботы не обладают когнитивными возможностями человека. чтобы самим оценить проблему. Серия TPS/i



Новый эталон эффективности, качества и надежности. TPS/i Robotics взаимодействует с пользователем на интеллектуальном уровне и оказывает надежную поддержку при настраивании параметров, выборе подходящих опций

Robotics, в которой реализованы интуитивные средства управления посредством текстового дисплея, предварительно заданные характеристики для каждой области применения и индивидуальное программирование посредством графического пользовательского интерфейса, устанавливает новые стандарты взаимодействия между человеком и машиной.

Инновационная система TPS/i Robotics обеспечивает усовершенствование процесса сварки во всей производственной среде. Она предоставляет уникальные преимущества в плане эффективности, качества и надежности автоматических сварочных производственных линий и гарантирует недостижимый ранее уровень продуктивности.

Эффективность — это обязательное условие коммерческого успеха. И это всего лишь одна из областей, в которых TPS/i Robotics устанавливает новые стандарты. Программная настройка, скорость сварки и возможности технического обслуживания обеспечивают высочайшие уровни конкурентоспособности и рентабельности в современном серийном производстве. Программирование новых процессов, переналадка системы и переход от одной стадии процесса к другой могут



^{*} Статья на правах рекламы.



Система TPS/i Robotics доступна для укомплектации любой модели сварочного робота

потребовать много времени. Что касается настройки, технического обслуживания, управления и переналадки, система TPS/i Robotics предлагает множество усовершенствований, позволяющих свести к минимуму дорогостоящие простои.

Идеальное взаимодействие сварочных процессов (LSC и PMC) в сочетании с интеллектуальными стабилизаторами проплавления и длины дуги обеспечивают более быструю и качественную работу, а также низкие уровни брака.

Функция стабилизации проплавления обеспечивает равномерное проплавление и постоянную малую длину дуги, а значит,

высокую скорость сварки. Благодаря всем перечисленным преимуществам TPS/i Robotics является самой эффективной сварочной системой для автоматизированного производства.

Сварочные системы Fronius всегда считались отраслевым стандартом высочайшего качества. Главная цель — выполнять кажущиеся невозможными сварные соединения металлов. Кроме набора функций, улучшающих параметры сварочной дуги, TPS/i Robotics обеспечивает полное документирование процесса. Обновления системы и новые характеристики можно устанавливать непосредственно по сети или через интерфейс USB. Благодаря использованию устройства WeldCube, которое объединяет все источники тока на производственной линии и записывает нужные данные, можно реализовать возможности оптимизации и выявить ошибки в производственном процессе. Контроль и проверка качества — важные составляющие анализа производственного процесса.

Для Fronius надежность — это не просто защита системы от физических повреждений, которая неизменно обеспечивается путем тщательных испытаний и использования высококачественных материалов. Основные усилия направлены на то, что действительно важно в промышленности — на надежность производства, даже в будущем. Благодаря использованию высококачественных материалов и тщательным испытаниям под нагрузкой естественный износ сведен к минимуму. Модульная конструкция системы, возможность обновления программного обеспечения и постоянное совершенствование процессов служат наилучшими гарантиями возможности использования оборудования как сейчас, так и в будущем.

Fronius International — австрийское предприятие с главным офисом в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Заттледте. Предприятие специализируется на системах для заряда батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3385 сотрудников. Доля экспорта составляет 93 %, что достигается благодаря работе 21 дочерней компании, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах мира. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 928 действующим патентам, Fronius является лидером в 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



Источники питания для дуговой сварки и наплавки с улучшенными технологическими характеристиками

А.В. СТЕПАХНО¹, АНТ. В. СТЕПАХНО¹, В.В. АНДРЕЕВ², В.А. КОРИЦКИЙ²

¹Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е.О. Патона. 03045, г. Киев, ул. Ново-Пироговская, 66. E-mail: office@paton.ua

²ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Опытный завод сварочного оборудования (ОЗСО) ИЭС им. Е.О. Патона выпускает около 40 видов оборудования для дуговой сварки. К этой номенклатуре относятся сварочные трансформаторы, выпрямители для ручной и механизированной сварки, специализированные источники питания.

Трансформаторы для ручной дуговой сварки получили широкое распространение при выполнении монтажных и ремонтных работ на промышленных предприятиях, стройках, фермах, в автохозяйствах, коммунальных предприятиях, в цеховых условиях и на трассах трубопроводов. Сварочные трансформаторы позволяют вести процесс сварки на более интенсивных режимах, чем выпрямители, так как при сварке переменным током практически отсутствует магнитное дутье. В этом случае электромагнитная сила, действующая на сварочную дугу, определяется результирующим магнитным потоком, равным геометрической сумме магнитных потоков сварочного и вихревых токов, индуцируемых в массе основного металла. Так как составляющие этих потоков находятся почти в противофазе, то результирующая величина их невелика, и поэтому проявление магнитного дутья по сравнению с постоянным током радикально ослабляется даже при очень больших сварочных токах (до 2000 А).

Известны и другие преимущества переменного тока. Например, сварка на переменном токе значительно экономичнее с точки зрения расхода электроэнергии. КПД сварочных трансформаторов, как правило, выше, чем у источников питания постоянного тока. Сварочные трансформаторы имеют простое устройство, требуют минимального ухода и текущего ремонта и поэтому расходы на их эксплуатацию и обслуживание сравнительно невелики.

Переменный ток по своему технологическому воздействию на ванну подобен модулированному току с частотой 50 Гц. Структура металла сварного шва получается более мелкозернистая и его качество на переменном токе лучше, чем при сварке постоянным током электродами одной и той же марки. Ценен также процесс очищения свариваемого изделия от окисных пленок при сварке переменным током алюминия и его сплавов неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах и их смесях. Поэтому аргонодуговая сварка алюминия неплавящимся электродом производится только переменным током.

К недостаткам традиционных сварочных трансформаторов следует отнести низкую стабильность горения дуги переменного тока, обусловленную погасанием и зажиганием дуги при изменении полярности (100 раз в секунду при частоте 50 Гц), а также отрицательным влиянием переноса металла в этих условиях. Улучшения стабильности горения дуги можно добиться путем повышения напряжения холостого хода трансформатора, применением переменного тока прямоугольной формы, увеличением частоты тока или наложением на ток основной частоты колебаний повышенной частоты. Все перечисленные приемы сопряжены с большим расходом активных материалов, идущих на изготовление силовых трансформаторов и других узлов, составляющих основу источников питания и соответственно их удорожанием.

Благодаря исследованиям, выполненным в ИЭС им. Е.О. Патона, и разработанным специальным импульсным устройствам стабилизации горения дуги (УСГД), этот недостаток сварочных трансформаторов можно считать преодоленным. Построенные на современной элементной базе УСГД доведены до высокой степени совершенства и представляют собой недорогие малогабаритные устройства, легко размещаемые в кожухе любого сварочного трансформатора. УСГД поддерживает устойчивый дуговой

разряд путем генерирования и подачи в дуговой промежуток импульсов напряжения в начале каждого полупериода. В данном случае стабилизация сварочной дуги заключается в следующем. Обычно при сварке на переменном токе дуга гаснет, когда сварочный ток при подходе к нулевому значению уменьшается до величины, близкой к 5 А. Обрывы происходят с удвоенной частотой переменного тока. Повторное зажигание дуги требует более высокого напряжения, чем напряжение дуги. Для надежного зажигания дуги необходимо, чтобы в начале полуволны сварочного тока УСГД выработал и подал на Рис. 1. Форма сварочного тока при импульсной стабилизации вторичную обмотку трансформатора импульсы ам- горения дуги

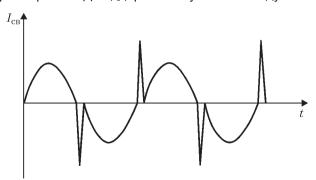


Таблица 1. Технические характеристики трансформаторов, выпускаемых на ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона

·				,		,	
Параметры	Источники питания						
	СТШ-250 СГД	СТШ-252 СГД	СТШ-256 СГД	СТШ-315 СГД	СТШ-400 СГД	СТШ-401 СГД	
Номинальное напряжение питающей сети, В	1×220, 2×2380	1×2220, 2×2380	1×2220, 2×2380	2×2380	2×2380	2×2380	
Номинальный сварочный ток, A	250	250	250	315	400	400	
Продолжительность нагрузки (ПН)	20 %/250 A 100 %/112 A	40 %/250 A 100 %/158 A	20 %/250 A 100 %/112 A	40 %/315 A 100 %/200 A	60 %/400 A 100 %/310 A	60 %/400 A 100 %/310 A	
Пределы регулирования сварочного ока, А	70260	70260	70260	90315	90400	25400	
Стабилизатор горения дуги «УСГД»	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	
Напряжение холостого хода, В	65	65	65	55	53	53	
Номинальная потребляемая ощность, кВА	16,3	16,3	16,3	17,5	22,0	22,0	
Охлаждение	Естеств.	Принудит.	Естеств.	Принудит.	Принудит.	Принудит.	
Габаритные размеры, мм $(L \times B \times H)$	424×275×425	546×400×560	424×275×425	540×520×595	800×520×630	800×520×630	
Масса, кг	49,2	65,0	55,2	80,0	110,0	111,0	

плитудой до 500 В. Эти импульсы облегчают повторное зажигание дуги, что и способствует повышению стабильности ее горения (рис. 1).

В ИЭС им. Е.О. Патона разработаны различные модификации УСГД, позволяющие вести ручную дуговую сварку практически любыми электродами, как для переменного, так и для постоянного тока. При разработке этих устройств к ним предъявлялись требования экономичности, малых габаритных размеров и материалоемкости, долговечности и надежности. Выпускаемая в настоящее время модель такого устройства УСГД-4М У2 в полной мере удовлетворяет этим требованиям. Потребляемая мощность УСГД-4М У2 — не более 160 ВА, масса — 0.4 кг, габаритные размеры 130×130×60 мм.

Подключение УСГД к любому трансформатору для ручной дуговой сварки делает его практически универсальным по сварочно-технологическим свойствам. В этом случае сварочный трансформатор может заменить источник постоянного тока (выпрямитель, генератор) или установку для аргонодуговой

Таблица 2. Основные технические характеристики выпрямителей серии ВД

Параметры	Наименование выпрямителя						
Параметры	ВД-250	ВД-310	ВД-500	ВД-255 АС/DС	ВД-400 АС/DС		
Напряжение питающей сети, В	3×380	3×380	3×380	2×380	2×380		
Номинальный сварочный ток, A	250	315	500	AC 250/DC 225	AC 400/DC 300		
Продолжительность нагрузки (ПН %))	40 %/250 A 100 %/158 A	60 %/315 A 100 %/244 A	60 %/500 100 %/387	40 %/AC 250/DC 225 100 %/AC 158/DC 145	60 %/AC 400/DC 300 100 %/AC 310/DC 232		
Пределы регулирования сварочного тока, А	3080 80250	45125 125315	75220 220540	AC 70250 DC 60225	AC 90400 DC 75300		
Напряжение холостого хода, В	65/96	65/96	67/96	75	75		
Номинальная потребляемая мощность, кВА	17	22	48	16,3	25		
Охлаждение	Принудит.	Принудит.	Принудит.	Принудит.	Принудит.		
Габаритные размеры, мм $(L \times B \times H)$	860×570×770	905×770×825	905×770×825	660×550×610	910×530×600		
Масса, кг	125	220	240	90	120		

сварки. Для питания УСГД сварочный трансформа- Таблица 3. Основные параметры выпрямителя тор снабжается дополнительной слаботочной обмоткой. Блок управления УСГД подключает устройство к работе после первого контакта электрода с изделием и точно отслеживает момент подачи импульса после прохождения сварочного тока через ноль. В блок управления постоянно поступает информация о сварочном токе и о напряжении дуги. Поэтому стабилизирующие горение дуги импульсы подаются в дуговой промежуток на всех режимах работы сварочного трансформатора (холостой ход, короткое замыкание, горение дуги). Через одну секунду после прекращения сварки УСГД отключает-

Параметры	BC-650CP
Напряжение питающей сети, 50 Гц, В	3×380
Номинальный ток, А при ПН %	650 (80 %)
Пределы регулирования напряжения холостого хода $U_{x,x}$. В	1858
Число ступеней регулирования U_{xx}	27
Номинальная мощность, кВА	40
Внешняя характеристика	Жесткая
Диапазон сварочного тока, А	50650
Габаритные размеры, мм	780×750×790
Масса, кг, не более	200

ся. Следует отметить, что аналогов УСГД в мировой практике пока нет.

ОЗСО ИЭС им. Е.О.Патона освоил серийное производство трансформаторов с регулируемым магнитным рассеянием для дуговой сварки типа СТШ в комплекте с УСГД-4М У 2 (рис. 2). Практика показала, что применение УСГД совместно с трансформаторами типа СТШ позволяет получить существенный экономический эффект, благодаря которому быстро окупаются основные затраты, связанные с приобретением подобного оборудования. В табл. 1 представлены технические характеристики некоторых моделей сварочных трансформаторов, выпускаемых на ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона.

Основным преимуществом источников питания серии СТШ-СГД является их многофункциональность, которая позволяет использовать их:

- при ручной дуговой сварке черных сталей покрытыми электродами, предназначенными для переменного тока (АНО-4, МР-3 и пр.) и для постоянного тока (УОНИ-13/45, УОНИ-13/55, ВИ-10-6 и пр.);
- при ручной дуговой сварке нержавеющих и специальных сталей (электродами ОЗЛ-8, ОЗЛ-26, ЦЛ-39 и пр.);
 - при ручной дуговой сварке чугуна электродами ЦЧ-4;
- при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом нержавеющих сталей, алюминия и его сплавов в тех случаях, когда допускается начальное зажигание дуги контактным способом.

Таким образом, по сварочно-технологическим возможностям эти источники вполне могут заменить более дорогие сварочные выпрямители и генераторы. Трансформаторы типа СТШ-СГД по желанию заказчика могут комплектоваться электрододержателями, а также горелками фирмы «Abikor Binzel» для аргонодуговой сварки.

Выпускаемые ОЗСО выпрямители серии ВД (рис. 3) с механическим регулированием тока используются в основном при сварке покрытыми электродами различных металлоконструкций в строительстве, машиностроении, горнорудной и металлургической промышленности, аграрном комплексе.

Выпрямители просты в обращении и достаточно надежны в эксплуатации. Диапазон регулирования сварочного тока разбит на две ступени. В пределах каждой ступени плавное регулирование сварочного тока обеспечивается изменением расстояния между катушками первичных и вторичных обмоток силового трансформатора. Переход с одной ступени на другую производится переключателями барабанного типа, которыми оснащены выпрямители.

Наиболее распространенный в сварочном производстве выпрямитель ВД-310, выпускаемый ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона, имеет плавное регулирование сварочного тока от 45 до 315 А и обладает достаточно высокими технологическими свойствами, обеспечивая стабильный процесс сварки и качественное формирование шва при низком разбрызгивании электродного металла. Однако при сварке корневых швов трубопроводов электродами малого диаметра (2,5...3,0 мм) на токах 65...80 А был отмечен эффект «примерзания» электрода, что впоследствии приводило к определенным трудностям ведения сварки. Как показала практическая проверка, причина такого явления кроется в недостаточной величине тока короткого замыкания (КЗ) выпрямителя при работе в диапазоне малых токов. Например, при сварке от выпрямителя ВД-310 на токах 65...80 А ток КЗ выпрямителя практически не отличается от тока сварки. Учитывая это обстоятельство, было предложено модернизировать выпрямитель ВД-310, снабдив его дополнительным низковольтным источником постоянного тока сравнительно небольшой мощности (порядка 5 % мощности основного выпрямителя), который вступал бы в работу и увеличивал ток как непосредственно перед КЗ, так и во время замыкания дугового промежутка каплей расплавленного металла.

Выпрямитель ВД-310 может комплектоваться и другой выпрямительной приставкой с напряжением холостого хода 96 В и током КЗ, равным 15 А. Это позволяет повысить эластичность дуги, что важно при сварке в узкую разделку. Предлагаемое комбинированное питание дуги обеспечивает надежный провар корня шва при сварке трубопроводов без погасания дуги и «примерзания» электрода, что суще-

Таблица. 4. Технические характеристики источников питания серии ВДИ

Taomiqu. 4. Team reekile aupukte	F :						
Поположения	Наименование						
Параметры	ВДИ-120М	ВДИ-120Р	ВДИ-160М	ВДИ-160Р	ВДИ-200М	ВДИ-200Р	
Максимальный диаметр электрода, мм	3	3	4	4	5	5	
Номинальное напряжение питающей сети, В	1×220	1×220	1×220	1×220	1×220	1×220	
Номинальный сварочный ток, А	120	120	160	160	200	200	
Максимальный сварочный ток, А	160	160	215	215	270	270	
Продолжительность нагрузки (ПН)%	70 %/120 A 100 %/101 A	70 %/120 A 100 %/101 A	70 %/160 A 100 %/134 A	70 %/160 A 100 %/134 A	70 %/200 A 100 %/167 A	70 %/200 A 100 %/167 A	
Пределы изменения напряжения в сети, В	170260	170260	170260	170260	170260	170260	
Пределы регулирования сварочного тока, A	5120	5120	7160	7160	10200	10200	
Горячий старт «Hot Start»	Автом.	Авт./ручное	Автом.	Авт./ручное	Автом.	Авт./ручное	
Форсированная дуга «Arc Force»	Автом.	Авт./ручное	Автом.	Авт./ручное	Автом.	Авт./ручное	
Напряжение холостого хода, В	96	96	96	96	96	96	
Номинальная потребляемая мощность, кВА	3,2	3,2	4,4	4,4	5,6	5,6	
Максимальная потребляемая мощность, кВА	4,3	4,3	5,9	5,9	7,5	7,5	
Cos φ	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	
КПД, %	93	93	93	93	93	93	
Охлаждение	Принудит.	Принудит.	Принудит.	Принудит.	Принудит.	Принудит.	
Габаритные размеры, мм длина	390	390	400	400	430	430	
ширина	110	110	140	140	170	170	
высота	240	240	270	270	295	295	
Масса, кг	6,2	6,3	7,4	7,5	9,8	9,9	

ственно расширяет область применения выпрямителя ВД-310. По своим технологическим свойствам модернизированный выпрямитель ВД-310 сопоставим со сварочными агрегатами, которые используются в настоящее время при сварке трубопроводов. Технологические испытания модернизированного таким образом выпрямителя ВД-310 на штатных образцах труб (материал сталь 20) диаметром 219 и 108 мм с толщиной стенки 8 и 12 мм соответственно показали, что подключение приставок обеспечивает стабильный процесс сварки без эффекта «примерзания» электрода на режимах 65...80 А. Сварка выполнялась электродами АНО, ТМ60, LB 52U, УОНИ 13/55.

По желанию заказчика источники питания серии ВД могут поставляться в универсальном по роду тока (AC/DC) исполнении для сварки покрытыми электродами. Основные технические характеристики выпрямителей серии ВД приведены в табл. 2.

Для механизированной сварки и наплавки сплошной и порошковой проволокой в среде защитных

Таблица 5. Основные технические характеристики трансформаторов типа ТШС и ТШП

	Наименование					
Параметр	TIIIC 1000/3	TIIIC 3000/1	TIIIC 3000/3	ТШП 10000/1		
Напряжение питающей сети, В	3×380	2×380	3×380	2×380		
Номинальный сварочный ток, А при ПН 100 %	1000	3000	3000	10000		
Номинальная мощность, кВА	170	138	500	760		
Напряжение холостого хода, В	3862	13,546	863	4076		
Число ступеней регулирования напряжения холостого хода	18	10	48	4		
Охлаждение принудительное	Воздушное	Водяное	Водяное	Водяное		
Масса, кг	1400	600	2200	2400		

газов на ОЗСО освоен выпуск выпрямителей серии ВС на токи 300, 400, 500 и 650 А. Наиболее перспективной моделью можно назвать выпрямитель ВС-650 СР. Этот выпрямитель обеспечивает питание одного сварочного поста при механизированной сварке и наплавке на токах до 650 А. При механизированной сварке диапазон регулирования напряжения на дуге 16...48 В. В отличие от традиционных сварочных выпрямителей источник,благодаря оригинальному специальному дросселю с внутренней обратной связью, обеспечивает стабилизацию длины дугового промежутка и размера капель перено-





Рис. 2. Сварочные трансформаторы серии СТШ-СГД (СТШ-256 СГД, СТШ-250 СГД, СТШ-252 СГД, СТШ-315 СГД, СТШ-400 СГД)

симого металла при сварке в защитных газах с короткими замыканиями, что существенно улучшает формирование шва и качество сварки во всех пространственных положениях при минимальном разбрызгивании электродного металла. Выпрямитель BC-650CP может использоваться при сварке под флюсом, а также при многопостовой сварке покрытыми электродами. Для регулирования тока на постах могут подключаться балластные реостаты либо транзисторные импульсные регуляторы (чопперы). Количество постов определяется в зависимости от тока на посту и коэффициента одновременности и загрузки. Основные параметры выпрямителя BC-650 CP приведены в табл. 3. Выпрямитель BC-650 CP может комплектоваться подающим механизмом БП-607, который обеспечивает подачу сплошной и порошковой электродной проволоки диаметром 1,0...2,4 и 1,2...3,6 мм соответственно в диапазоне скоростей 2...20 м/мин. Внешний вид сварочного выпрямителя BC-650CP и подающего блока БП-607 представлены на рис. 4.

Чопперы позволяют не только плавно регулировать параметры режима сварки, но и являются значительно экономичнее балластных реостатов. ОЗСО разработал и готовит к производству чоппер на 315 А ЧСИ-315М (рис. 5), которым будут комплектоваться многопостовые выпрямители на 630, 1250 и 5000 А.



Рис. 3. Сварочные выпрямители серии ВД







Рис. 5 Чоппер ЧСИ-315М





Рис. 4. Сварочный выпрямитель BC-650CP и подаю- Рис. 6. Источник питания серии ВДИ щий блок БП-607

- В последнее время ОЗСО производит современные источники питания на основе инверторов. К этой группе оборудования можно отнести выпрямители для ручной и аргонодуговой сварки серии ВДИ (рис. 6), которые обеспечивают высокое качество сварных швов. В автоматическом режиме выполняется ряд следующих дополнительных функций:
- а) горячий старт «Hot Start» — обеспечивает качественное начало сварки в момент зажигания дуги;
- б) форсированная дуга «Агс Force» служит для повышения стабильности горения на короткой дуге и предотвращения «залипания» электрода в момент перехода капли в сварочную ванну;
- в) антиприлипание «Anti Stick» дает сварщику без затруднений отделять (отрывать) электрод от изделия без риска обжечь



Рис. 7. Трансформатор ТШП 10000/1

глаза — при коротком замыкании между электродом и изделием (если такое произошло) происходит автоматическое снижение сварочного тока до минимума. После отделения электрода от изделия источник автоматически восстанавливает свою работоспособность;

- г) блок снижения напряжения холостого хода необходим при проведении сварочных работ в условиях повышенной системы электробезопасности. После окончания процесса сварки через 0,1 с напряжение на клеммах источника снижается до безопасного уровня 12 В.
- В табл. 4 приведены технические характеристики источников питания серии ВДИ.
- В ближайшее время на ОЗСО планируется возобновить выпуск специальных мощных трансформаторов типа ТШС на токи 3000 и 6000 А для шлаковых технологий (табл. 5). Трансформаторы ТШС-3000 входят в комплект печей: У102М для переплава прецизионных сплавов; У314 для переплава активных и благородных металлов; Об 530 для переплава цветных металлов; Об 578М для выплавки флюсов.

Готовятся также к выпуску трансформаторы трехфазные типа ТШС-1000/3 и ТШС-3000/3. Трансформаторы ТШП-10000 (рис. 7) входили в комплект печей: У189 для обогрева шлаковой ванны; У360 для переплава металлов в слитки до 350 кг; Р951 для переплава металлов в слитки до 1500 кг.

Основные технические данные трансформаторов типа ТШС и ТШП приведены в табл. 5.

Новое поколение традиционных источников питания для сварки с улучшенными технологическими характеристиками, выпускаемых ОЗСО Института электросварки им. Е.О. Патона, находит широкое применение в различных областях промышленного производства.