

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

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

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

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

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

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

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

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

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

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

СОБЫТИЯ

Обзор технологий и оборудования для термической
резки металлов (по результатам посещения
Международного промышленного форума) 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Позняков В. Д., Шелягин В. Д., Жданов С. Л., Бернацкий А. В., Максименко А. А., Сиора А. В. Влияние параметров
дугового, лазерного и гибридного способов сварки на
структуру и свойства стыковых сварных соединений
из высокопрочной стали S460M 7
Лобанов Л. М., Махлин Н. М., Коротынский А. Е., Буряк В. Ю., Сипаренко А. Г. Резистометрический способ изме-
рения скорости сварки для тренажерных сварочных
систем 15
Кулинич М. В., Безпальчук В. Н., Косинцев С. Г., Гусак А. М., Запорожец Т. В., Устинов А. И. Расчетно-экспериментальное исследование тепловых полей
в нестационарном процессе пайки 22
Аснис А. Е., Терновой Е. Г., Великоиваненко Е. А., Миленин А. С., Розынка Г. Ф. Напряженно-деформированное
состояние сварных соединений из алюминиевых сплавов в условиях, имитирующих открытый космос 29

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Нестеренков В. М., Матвейчук В. А., Русыник М. О. Получение промышленных изделий с применением
электронно-лучевых технологий для 3D печати 34
Белый А. И., Жудра А. П., Дзыкович В. И., Петров В. В. Электроды для дуговой наплавки композиционных
сплавов 40
Кусков Ю. М. Влияние состава флюса на процесс торцевой электрошлаковой наплавки с отдельной подачей
присадочного материала 44
Соловьев В. Г. Интернет-база данных процесса дуговой наплавки порошковыми проволоками 50

ХРОНИКА

Конференция Общества сварщиков Украины 55
К 90-летию академика Б. А. Мовчана 57

ИНФОРМАЦИЯ

Календарь января 58

Автоматичне Зварювання

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

Головний редактор **Б. Є. Патон**

ЗМІСТ

події

Огляд технологій та устаткування з термічного різання металів (за результатами відвідін Міжнародного промислового форуму) 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Позняков В. Д., Шелягін В. Д., Жданов С. Л., Бернацький А. В., Максименко А. О., Сіора О. В. Вплив параметрів дугового, лазерного та гібридного способів зварювання на структуру та властивості стикових зварних з'єднань високоміцної сталі S460M 7

Лобанов Л. М., Махлін Н. М., Коротинський О. Є., Буряк В. Ю., Сіпаренко О. Г. Резистометричний спосіб вимірювання швидкості зварювання для тренажерних зварювальних систем 15

Кулініч М. В., Безпальчук В. М., Косінцев С. Г., Гусак А. М., Запорожець Т. В., Устінов А. І. Розрахунково-експериментальне дослідження теплових полів при нестационарному процесі паяння 22

Асніс Ю. А., Терновий Є. Г., Великоіваненко О. А., Міленін О. С., Розинка Г. П. Напружено-деформований стан зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів, отриманих в умовах, імітуючих відкритий космос 29

ВІРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Нестеренков В. М., Матвійчук В. А., Русинік М. О. Отримання промислових виробів із застосуванням електронно-променевих технологій для 3D друку 34

Білий О. І., Жудра О. П., Дзиковіч В. І., Петров В. В. Електроди для дугового наплавлення композиційних сплавів 40

Кусков Ю. М. Вплив складу флюсу на процес торцевого електрошлакового наплавлення з роздільною подачею присадного матеріалу 44

Соловйов В. Г. Інтернет-база даних процесу дугового наплавлення порошковими дротами 50

ХРОНІКА

Конференція Товариства зварників України 55
До 90-річчя академіка Б. О. Мовчана 57

ІНФОРМАЦІЯ

Календар січня 58

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

Адреса редакції

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

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

CONTENTS

EVENTS

Review of technologies and equipment for thermal metal cutting (from results of visit to International Industrial Forum) 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Poznyakov V. D., Shelyagin V. D., Zhdanov S. L., Bernatskii A. V., Maksymenko A. A., Siora A. V.

Effect of parameters of arc, laser and hybrid methods of welding on structure and properties of butt joints of high-strength steel S460M 7

Lobanov L. M., Makhlin N. M., Korotytsky A. E., Buryak V. Yu., Siparenko A. G. Resistometric method of measuring welding speed for arc welding simulation systems 15

Kulinich M. V., Bezpalchuk V. N., Kosintsev S. G., Gusak A. M., Zaporozhets T. V., Ustinov A. I. Computational and experimental investigation of thermal fields in the process of non-stationary brazing 22

Asnis E. A., Ternovoj E. G., Velikoivanenko E. A., Milenin A. S., Rozyinka G. F. Stress-strain state of welded joints from aluminium alloys under the conditions simulating open space 29

INDUSTRIAL

Nesterenkov V. M., Matvijchuk V. A., Rusynik M. O. Manufacture of industrial products using electron beam technologies for 3d-printing 34

Belyi A. I., Zhudra A. P., Dzykovich V. I., Petrov V. V. Electrodes for arc surfacing of composite alloys 40

Kuskov Yu. M. Influence of flux composition on the process of electroslog surfacing of end faces with discrete feeding of filler material 44

Solovyev V. G. Internet database of arc surfacing process using flux-cored wires 50

NEWS

Conference of Society of Welders of Ykraine 55
Towards the 90th birthday anniversary of Movchan B. A. 57

INFORMATIONS

Calendar of January 58

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

Address

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



ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

(по результатам посещения

Международного промышленного форума)

На выставке «Промышленный форум» (21–24 ноября 2017 г., г. Киев)

были представлены практически все виды промышленной резки металлов.

Лазерная резка. Это один из современных высокотехнологических способов резки металла, который осуществляется при интенсивном прямом воздействии лазерного луча на заготовку. Главное его достоинство — минимальная ширина реза (от 0,01 мм) и отличное качество кромок. При этом в отличие от плазменной и газокислородной резки исключается критический перегрев металла (он не деформируется и не окисляется).

Фирма «Aramis Technologies» (Чехия), входящая в совместную группу компаний «Aramis» (Чехия и Украина), является одним из крупнейших производителей лазерных комплексов для резки в Восточной Европе. Производственные площадки компании расположены в г. Черкассы и в г. Галич-кув Брод (Чехия). На выставке были продемонстрированы комплексы LTC75, AFL и AFX. В них использованы прецизионные системы движения и наиболее качественные комплектующие от ведущих мировых производителей. Комплексы лазерной резки позволяют производить раскрой листового проката с высокой производительностью и максимальным качеством обработки.

Компания «Сфера-Техно» представила оборудование фирмы «Trumpf» — мирового лидера на рынке листообрабатывающего оборудования. Предлагает полную линейку оборудования, необходимого в производственной цепочке, включая станок, источник, автоматизацию и программное обеспечение. Компания предлагает станки TruLaser серии 1000, 3000, 5000, 7000 и 8000. Точность позиционирования станков от 0,1 до 0,05 мм. Максимальная толщина реза в зависимости от серии составляет для конструкционных сталей 16...25 мм, для нержавеющей стали

8...25 мм, для алюминия 6...25 мм, для меди 3...10 мм, для латуни 3...10 мм. Максимальная скорость в диапазоне 85...300 м/мин. Станки отличаются рядом «умных» функций:

- обработкой плохого по качеству материала;
- резкой толстого и тонкого металла;
- стратегией одной режущей головки;
- распознаванием положения и автоматического определения фокусного расстояния;
- защитой линзы от загрязнения и др.

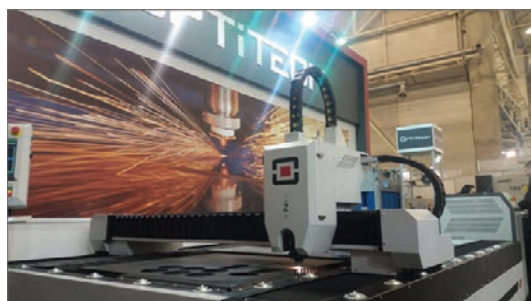
Компания «Ель Сель Групп» (г. Киев) представила широкую линейку станков для обработки металлических и неметаллических материалов. Среди них закрытые и комбинированные оптоволоконные лазерные комплексы и станки для раскрой листового металла и труб с мощностью источника от 500 до 6000 Вт и максимальной скоростью перемещения до 120 м/мин. Подходят для резки листов и труб из углеродистой и нержавеющей стали, меди, алюминия, титана, латуни и листов с гальваническим покрытием.

Фирма «Bodor» (Китай) представила серию комплексов волоконно-лазерной резки под девизом «Будущее значит сейчас». Она специализируется на НИОКР, производстве и маркетинге промышленного лазерного режущего оборудования. Система контроля качества фирмы «Bodor» проходит через весь процесс перемещения металла, включая контроль входного материала, управление линией обработки, контроль качества готовой продукции и полное тестирование машины.

Компания «Тулпресс-Техно» (г. Киев) обеспечивает поставку передового технологического оборудования от корпораций «Prima Power» (Италия, Финляндия, США) для лазерной резки почти всех материалов со скоростью перемещения до 170 м/мин.

На стенде компании «Станкопромимпорт» (г. Харьков) посетители знакомились со станками для лазерной резки от компании «Окима» (Япония). Последняя, понимая непростую экономиче-





скую ситуацию в Украине, предлагает приобрести оборудование в кредит или в лизинг на 5 лет.

Фирма «Зонт» (г. Одесса) демонстрировала лазерный программно-технологический комплекс ZENIT-3015 собственной разработки. По важнейшим технико-экономическим параметрам (соотношение цена/производительность, себестоимость деталей, надежность оборудования) оборудование превосходит аналоги ведущих мировых производителей.

Компания «Optihech» (г. Черкассы) демонстрировала серию лазерных технологических комплексов линейки «Optihech» с волоконным итербиевым лазерным источником мощностью 500, 700 и 1000 Вт для раскроя листовых материалов.

Фирма «Артель ЛТД» (г. Николаев) представила новинку 2017 г. — АРТЛАЗЕР-3015. Это комплекс лазерного листового раскроя черной и нержавеющей стали, алюминия, меди, латуни и др. АРТЛАЗЕР-3015 является высокопроизводительным инструментом, предназначенным для высокоточного раскроя листового проката.

Плазменная резка. Она обеспечивает обработку металлов и диэлектриков любой твердости струей плазмы. Режет, в основном, листовый металл толщиной до 200 мм. Обеспечивает тонкий, ровный и гладкий разрез. Технология плазменной резки одна из самых точных и быстрых. Металл в зоне разреза не перегревается. На выставке она была представлена на стенде компании «Тандем», демонстрировавшей также профессиональные системы от Hypertherm для ручной плазменной резки и стружки металла толщиной 10, 25, 38 мм. Системы включают источник питания и стандартные типы резаков Дугатах.

Компания «Рефим» (г. Ивано-Франковск) предлагала системы Powermax компании «Hypertherm» для резки металлов толщиной до 75 мм. В си-

стемах «Hypertherm» в качестве плазмообразующего и защитного газа используются негорючие газы (воздух для углеродистых сталей и азот для нержавеющей).

Компания «Техмаш» (г. Одесса) предлагает машины плазменной резки «Альфатех» и «Шаттл» для толщин металла 0,5...160 мм в диапазоне токов 15...1000 А с надводной и подводной резкой.

Киевское отделение компании «We R.Supply» предлагает на украинском рынке системы для плазменной, лазерной, гидроабразивной резки с ЧПУ компании «MultiCam» (США).

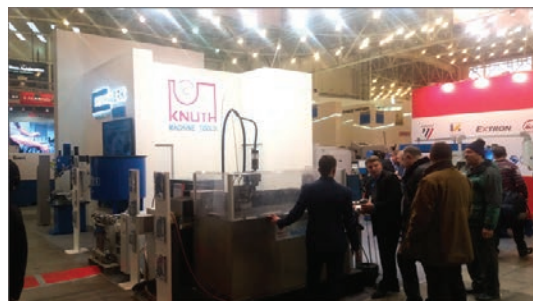
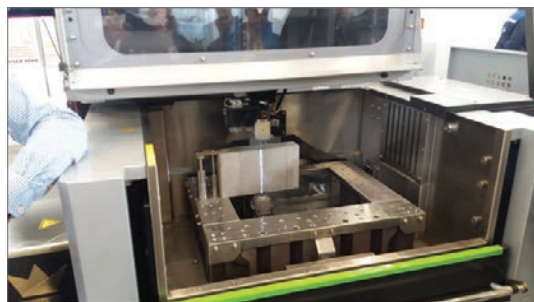
На стенде компании «Фрониус Украина» была представлена информация о системах Powermax (Hypertherm) для механизированной резки, в том числе реализуемых при роботизированной резке в трехмерном пространстве.

На стенде компании «Интер Плюс» (г. Белая Церковь) был представлен станок «Плазморез HD Speed 300» (фирмы «Lenker»). У места резки станок имеет водяное охлаждение, что приводит к чистому резу материала, сокращению выброса газов и значительно сокращает затраты.

Компания «Kalafat» (г. Киев) представила на выставке аппараты для плазменной резки и оптоволоконный станок Legend для лазерной резки производства фирмы «Dener» (Турция).

На стенде компании «Эсаб Украина» демонстрировалось промышленное оборудование для ручной плазменной чистовой резки металла толщиной 12, 25, 40 мм. В комплект поставки входит источник питания, плазматрон, комплект расходных деталей, воздушный фильтр, регулятор, рабочий кабель и кабель питания.

На стенде фирмы «Мигатех Индустрия» (г. Киев) под девизом «Новый взгляд. Новые возможности» демонстрировалось оборудование для



плазменной и лазерной резки многих производителей.

Центр станкостроения «Алиста» (г. Днепр) демонстрировал машины для плазменной резки турецкого производителя «Durma».

Фирма «Идель» (г. Одесса) демонстрировала оборудование для автоматизированной газовой и плазменной резки производства компаний «Oerlikon», «Weldline», «Saf Fro».

Газовая резка. Как и резка электрической дугой предполагает воздействие на материал температуры, значительно превосходящей температуру плавления металла в ограниченной зоне действия кислородно-пропанового потока. Точность реза невысока, но не требует сложного оборудования и особых условий.

Завод автогенного оборудования «Донмет» (г. Краматорск) представил гамму оборудования для газопламенной резки металлов:

- газокислородные резаки для резки низкоуглеродистых сталей толщиной до 100...300 мм;
- резаки для газокислородной разделительной резки металлолома, отрезки прибылей литья, зачистки дефектов литья и проката, строжки канавок и поверхностей;
- комплект флюсовой резки — для резки любых сталей и чугуна (используется флюс на основе железного порошка);
- резаки жидкотопливные (керосинорезы, бензорезы и резаки, использующие дизельное топливо) работают при температурах до -25°C .

Завод «Донмет» производит резаки для газорезательных машин Радуга, Орбита, Микрон, АСШ, а также для газорезательных машин производства Польши, Чехии, Италии, Германии, Румынии, США, Великобритании, Японии.

Фирма «Зонт» (г. Одесса) представила машины серии «Метеор» для термической резки листов и машины «Комета-М» фигурного раскроя, а также машину «Радуга-М» для кислородной резки листового проката двумя резаками и системы плазменной резки фирм «Hypertherm», «Kjellberg», «Daihen».

Компания «Техмаш» (г. Одесса) предлагает машины «Альфатех» для газокислородной резки металлов (слябов и заготовок) в диапазоне толщин от 5 до 600 мм. Машины могут оснащаться несколькими резаками и обеспечивать резку со скосом кромок под сварку.

Компания «Сталь Сервис Центр» (г. Львов) демонстрировала машину термического раскроя SOF-1530 HDP, созданную для работы с источниками плазмы высокой частоты. Она дает возможность резки металла газом толщиной 50 мм (пробивка) и 100 мм (с краю).



Компания «Сварка плюс» представила линейку источников для плазменной резки эконо серии СИТ 40/60/80/100HF для резки металлов толщиной 18/35/45/60 мм и индустриальной серии для резки металлов до 75 мм с ПВ до 100 %.

Гидроабразивная резка. В отличие от предыдущих способов предусматривает механическое, а не термическое воздействие. Резцом выступает вода в смеси с абразивным порошком, подаю-



сящая под высоким давлением. Обеспечивает рез 0,5...1,5 мм на листах толщиной до 300 мм. Процесс проходит при температурах не выше 90 °С, что является благоприятной характеристикой. Этим видом резки на станках ЧПУ можно обрабатывать пакеты из нескольких листов, что удобно при крупносерийном производстве. На выставке была представлена компанией «ОГМ-Технология» (г. Киев). Этот вид резки используется для материалов, чувствительных к нагреванию, труднообрабатываемых материалов, тех, которые засоряют режущий инструмент, а также мрамора, гранита, керамики, стекла, всех типов стали. Были представлены также комплексные системы компании «РТV» (Чехия) для резки водной и гидроабразивной струей высокого давления.

Компания «Aramis» также продемонстрировала оборудование для гидроабразивной резки. Это установки WCT2 и WCT3. Они позволяют производить раскрой практически любого материала, невзирая на его теплофизические свойства, и особенно эффективны для точного раскроя толстолистового и хрупкого материала.

Предприятие «Южстанкомаш» (г. Павлодар) специализируется на комплексном решении задач предприятий по приобретению, сервисному обслуживанию, ремонту и модернизации металлообрабатывающего оборудования. На выставке было представлено оборудование для гидроабразивной резки.

Фирма «Кнут Украина» (г. Днепр) знакомила посетителей выставки с широким ассортиментом металлообрабатывающего оборудования компании «Knuth Weruzengmashinen GmbH» (Германия) для плазменной, гидроабразивной резки и электроэрозионной обработки металлов.

Электроискровая обработка — одна из распространенных технологий работы с металлом, отличающаяся высокой точностью и производительностью. С ее помощью можно резать металл, сверлить отверстия вплоть до микроскопического диаметра, упрочнять поверхности, шлифовать изделия и другое. Этот вид технологии был достаточно широко представлен на выставке.

Компания «СодиКом-Дніпро» (г. Киев) представила бюджетные линейные вырезные электроискровые станки фирмы «Sodick» (Япония), имеющие современный механизм автозаправки проволоки с термообработкой концов. Эти станки позиционируются как самые покупаемые в мире электроискровые станки. Они уникальны по точности обработки металлов и надежности в работе. В Украине сегодня эксплуатируется свыше 100 установок для электроэрозионной обработки.

Предприятие «Машинтех» (г. Киев) демонстрировало электроэрозионные станки и оборудование для лазерной резки, поставляемое из Германии, Дании, Италии, Финляндии, Чехии и Японии.

Компания «Абпланалт Україна» представила электроэрозионные прошивные станки фирмы «Joemars» (Тайвань) и электроэрозионные проволочные и сверлильные станки фирмы «Ехсетек» (Тайвань).

Аналогичное по назначению оборудование, производимое в Китае, демонстрировала компания «Искростан» (г. Киев).

Многообразие представленного на выставке оборудования для различных технологий резки и металлообработки, а также высказывания специалистов, работающих в этой области, свидетельствуют о росте объемов металлообработки на предприятиях Украины в последние годы.

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

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОГО, ЛАЗЕРНОГО И ГИБРИДНОГО СПОСОБОВ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ S460M

В. Д. ПОЗНЯКОВ, В. Д. ШЕЛЯГИН, С. Л. ЖДАНОВ, А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. А. МАКСИМЕНКО, А. В. СИОРА
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе изучено влияние параметров дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки на формирование структуры и свойств металла швов и зоны термического влияния стыковых сварных соединений высокопрочной легированной стали S460M с пределом текучести до 480 МПа. Показано, что увеличение скорости дуговой сварки в защитных газах до 50 м/ч (13,9 мм/с) позволяет получить качественный шов с повышенными показателями статической прочности и ударной вязкости. При лазерной сварке с повышением скорости охлаждения снижаются показатели пластичности и ударной вязкости металла шва, что связано с образованием мартенситной закалочной структуры металла шва и зоны термического влияния сварных соединений, которая появляется при более высокой скорости охлаждения. Применение способа гибридной лазерно-дуговой сварки стали S460M позволяет снизить скорость охлаждения металла швов и зоны термического влияния по сравнению с лазерным способом сварки, благодаря чему обеспечивается высокий уровень механических свойств и ударной вязкости металла этих зон. Библиогр. 16, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: стыковые соединения, высокопрочная сталь, дуговая сварка, лазерная сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, термический цикл, особенности структуры, механические свойства

При изготовлении металлических конструкций из высокопрочных сталей [1] толщиной до 10 мм широко применяется механизированная и автоматическая дуговая сварка в среде активных защитных газов, а также в их смесях с инертными газами ($\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$) [2], как проволокой сплошного сечения, так и порошковой проволокой [3]. Предпочтительными, с точки зрения получения качественных сварных соединений, являются такие режимы дуговой сварки, при которых металл шва и зоны термического влияния (ЗТВ) сохраняет прочность, пластичность и хладостойкость на уровне основного металла и имеет высокую сопротивляемость образованию холодных трещин [4].

В последние годы с целью уменьшения деформации и повышения качества сварных тонкостенных (толщиной до 10 мм) металлических конструкций из низколегированных сталей ферритно-перлитного класса при их изготовлении внедряется лазерная [5, 6] и гибридная лазерно-дуговая сварка [7–16]. Преимуществами этих видов сварки являются [5–16]: повышение производительности за счет увеличения в несколько раз скорости сварки [7]; значительное снижение погонной энергии [8, 9]; получение равновесных мелкозернистых микроструктур в металле шва и ЗТВ [10–12], которые повышают прочность соединений, уменьшают уровень остаточных напряжений и снижают склонность к образованию трещин [13–15].

В связи с этим актуальными являются исследования влияния параметров технологических процессов лазерной, дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварки на структуру и свойства стыковых сварных соединений низколегированных сталей класса прочности С440...С490.

В настоящей работе изучалось влияние параметров дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки на формирование структуры, а также свойства металла шва и ЗТВ соединений высокопрочной легированной стали S460M с пределом текучести $\sigma_T = 480$ МПа следующего химического состава, мас. %: 0,15 C; 0,23 Si; 1,3 Mn; 0,09 Cr; 0,02 Ni; 0,23 Mo; 0,1 V; 0,6 Cu; 0,013 S; 0,017 P.

На начальном этапе работы было изучено влияние параметров режимов перечисленных выше способов сварки на условия нагрева и охлаждения стыковых сварных соединений толщиной 8 мм.

Автоматическая дуговая сварка таких соединений осуществлялась порошковой проволокой Megafil 821R диаметром 1,2 мм в смеси газов (82 % Ar + 18 % CO_2) на следующих режимах: сварочный ток $I_{CB} = 220...240$ А; напряжение на дуге $U_d = 30...32$ В; скорость сварки: $v_{CB} = 30; 40; 50$ м/ч (8,3; 11,1 и 13,9 мм/с, соответственно). Дальнейшее повышение скорости сварки оказалось нецелесообразным, поскольку при выбранных режимах сварки не удавалось получить качественные соединения — ухудшилось формирование шва, на-

чали появляться непровары, увеличилось разбрызгивание электродного металла.

При лазерном процессе скорость сварки находилась в пределах от 40 м/ч (11,1 мм/с) до 50 м/ч (13,9 мм/с) ($w_{6/5}=65\ldots103\text{ }^{\circ}\text{C/с}$). Параметры лазерного излучения составляли: мощность Nd:YAG лазера — 4,4 кВт, заглубление фокуса $\Delta F = -1,5\text{ мм}$.

При гибридной лазерно-дуговой сварке режимы лазерной составляющей были: мощность Nd:YAG лазера — 4,4 кВт, заглубление фокуса $\Delta F = -1,5\text{ мм}$. Параметры дуговой составляющей гибридного процесса сварки при постоянном расходе защитной газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ $Q_{\text{защ}} = 14\ldots16\text{ л/мин}$, изменялись в зависимости от скорости сварки. При скорости гибридной лазерно-дуговой сварки $v_{\text{св}} = 72\text{ м/ч}$ (20,0 мм/с) ток и напряжение на дуге составляли: $I_{\text{св}} = 120\text{ А}$, $U_{\text{д}} = 22\text{ В}$; при скорости сварки $v_{\text{св}} = 90\text{ м/ч}$ (25 мм/с) — $I_{\text{св}} = 170\text{ А}$, $U_{\text{д}} = 24\text{ В}$; при скорости сварки $v_{\text{св}} = 110\text{ м/ч}$ (30,5 мм/с) — $I_{\text{св}} = 200\text{ А}$.

Запись термических циклов сварки осуществлялась с помощью хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,5 мм, подключенных через USB-преобразователь электрических сигналов к персональному компьютеру. Их спай располагали в месте, где находился участок перегрева металла ЗТВ. В качестве параметра термического цикла, который в дальнейшем был использован как критерий для оценки его влияния на структуру и механические свойства металла шва и ЗТВ сварных соединений, была принята скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур 600...500 °C ($w_{6/5}$).

Анализ термических циклов автоматической дуговой сварки стыковых соединений стали S460M показал, что скорость нагрева таких соединений практически не зависит от скорости перемещения источника нагрева — сварочной дуги и составляет 180...200 °C/с. Существенное влияние скорость сварки оказывает на интенсивность охлаждения металла ЗТВ (рис. 1). С повышением

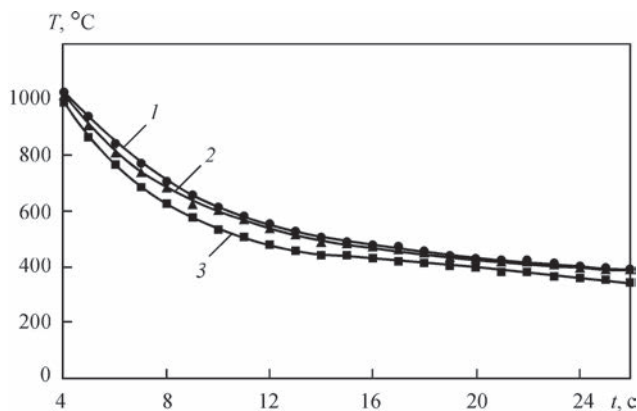


Рис. 1 Термические циклы при автоматической дуговой сварке стали S460M: 1 — $v_{\text{св}} = 30\text{ м/ч}$ ($w_{6/5} = 24\text{ }^{\circ}\text{C/с}$); 2 — 40 м/ч ($27\text{ }^{\circ}\text{C/с}$); 3 — 50 м/ч ($36\text{ }^{\circ}\text{C/с}$)

$v_{\text{св}}$ скорость охлаждения сварных соединений увеличивается. Так, охлаждение металла участка перегрева ЗТВ в интервале температур 600...500 °C при скорости сварки $v_{\text{св}} = 30\text{ м/ч}$ (8,3 мм/с) происходит со скоростью $w_{6/5} = 24\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, при $v_{\text{св}} = 40\text{ м/ч}$ (11,1 мм/с) $w_{6/5} = 27\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, а при скорости дуговой сварки $v_{\text{св}} = 50\text{ м/ч}$ (13,9 мм/с) металл ЗТВ охлаждается со скоростью $w_{6/5} = 36\text{ }^{\circ}\text{C/с}$.

Анализ термических циклов лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки стыковых соединений стали S460M показал, что значения скоростей нагрева металла ЗТВ до температур 1100...1300 °C и скоростей охлаждения участков перегрева в интервале температур 600...500 °C идентичны значениям, полученным для стали 14ХГН2МДАФБ [13].

С точки зрения структурообразования лазерный процесс сварки характеризуется «жестким» термическим циклом с достаточно высокими (до $w_{6/5} = 103\text{ }^{\circ}\text{C/с}$) скоростями охлаждения в металле ЗТВ сварных соединений стали S460M, что может привести к образованию в нем закалочных структур с высокой твердостью. Об этом свидетельствуют результаты исследований структурных превращений в металле ЗТВ стали S460M в процессе нагрева — охлаждения, полученные с использованием дилатометрии [16]. Для «смягчения» такого термического цикла целесообразно использовать гибридную лазерно-дуговую сварку, которая позволяет при сохранении производительности процесса обеспечивать охлаждение металла ЗТВ сварных соединений со скоростью $w_{6/5} = 58\ldots62\text{ }^{\circ}\text{C/с}$.

Различия в условиях охлаждения при дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке, обуславливают формирование различной структуры, что, в свою очередь, приводит к изменению механических свойств металла шва и ЗТВ сварных соединений. Об этом свидетельствуют результаты приведенных ниже исследований.

По данным металлографического анализа установлено, что микроструктура металла ЗТВ образцов стали S460M, выполненных дуговой сваркой, может изменяться от ферритной до бейнитной. При увеличении скорости охлаждения от $w_{6/5} = 24\text{ }^{\circ}\text{C/с}$ ($v_{\text{св}} = 30\text{ м/ч}$, рис. 2, а) до $w_{6/5} = 27\text{ }^{\circ}\text{C/с}$ ($v_{\text{св}} = 40\text{ м/ч}$, рис. 2, б) и $w_{6/5} = 36\text{ }^{\circ}\text{C/с}$ ($v_{\text{св}} = 50\text{ м/ч}$, рис. 2, в) она трансформируется из игольчатого феррита в бейнитную и состоит из разнонаправленных пакетов бейнита, содержащих остаточный аустенит. При этом возрастает значение интегральной микротвердости в металле ЗТВ образцов стали S460M (от HV0,1 — 2490...2730 МПа при $v_{\text{св}} = 30\text{ м/ч}$ до HV0,1 — 3530...3650 МПа при $v_{\text{св}} = 50\text{ м/ч}$, соответственно).

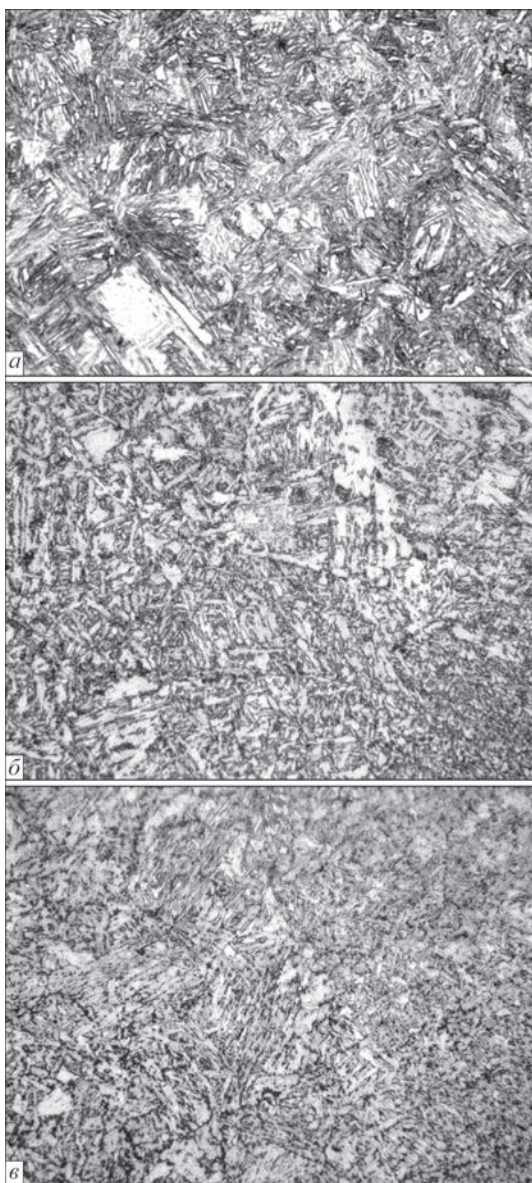


Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) металла ЗТВ сварных соединений стали S460M, полученных при различной скорости дуговой сварки: *a* — $v_{\text{св}} = 30$ м/ч (8,3 мм/с) ($w_{6/5} = 24$ °C/с); *б* — 40 м/ч (11,1 мм/с) ($w_{6/5} = 27$ °C/с); *в* — 50 м/ч (13,9 мм/с) (36 °C/с)

Для скоростей охлаждения $w_{6/5}$ образцов около 60 °C/с, характерных для гибридной лазерно-дуговой сварки, в металле ЗТВ сварных соединений стали S460M наблюдается трансформация структуры из бейнитной в мартенситную (рис. 3). Для этой скорости охлаждения характерна игольчатая мартенситная структура с разноразмерными иглами под углом 60 и 120°. Структура металла ЗТВ содержит темно- и светлотравящийся мартенсит. В данном случае микротвердость темнотравящегося мартенсита составляет $HV_{0,1} = 3600...3760$ МПа, а светлотравящегося — $HV_{0,1} = 3860...4260$ МПа.

С увеличением скорости охлаждения свыше 100 °C/с (характерной для лазерной сварки со скоростью $v_{\text{св}} = 50$ м/ч) в металле ЗТВ сварных соедине-

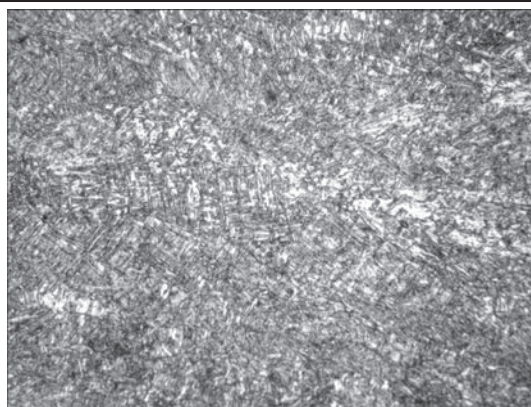


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) металла ЗТВ при гибридной лазерно-дуговой сварке стали S460M ($v_{\text{св}}$ примерно 90 м/ч (25,0 мм/с))

ний стали S460M также формируется мартенсит. Но при таких условиях охлаждения структура мартенсита состоит из более плотноупакованных пакетов, что приводит к дальнейшему росту значений микротвердости до $HV_{0,1} = 4100...4630$ МПа.

Для оценки механических свойств из сварных соединений изготавливали образцы согласно ГОСТ 6996-66 для испытаний на статическое растяжение (тип I) и на ударный изгиб с острым надрезом (тип X) как по металлу шва, так и по металлу ЗТВ. Образцы на растяжение испытывали при комнатной температуре, а на ударный изгиб при температурах от 20 до -40 °C.

Результаты исследований механических свойств сварных соединений, выполненных с использованием дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки, приведены в таблице.

Установлено, что с повышением скорости дуговой сварки от 30 м/ч ($w_{6/5} = 24$ °C/с) до 50 м/ч ($w_{6/5} = 36$ °C/с) значения предела текучести и предела прочности металла швов несколько возрастают от 582 до 607 МПа и от 625 до 657 МПа, соответственно. Ударная вязкость металла шва и ЗТВ сварных соединений при этом также увеличивается. Наиболее существенное увеличение показателей KCV наблюдается в образцах, которые испытывались при температуре -40 °C. В частности, с повышением $w_{6/5}$ от 24 ($v_{\text{св}} = 30$ м/ч) до 36 °C/с ($v_{\text{св}} = 50$ м/ч) значения KCV_{-40} металла шва увеличиваются от 70...83 до 137...161 Дж/см², а ЗТВ от 80...110 до 115...120 Дж/см². Пластичность металла шва таких соединений, независимо от выбранных условий сварки, практически не изменяется и находится на высоком уровне (относительное удлинение 21...23 %, а относительное сужение 68...70 %).

Результаты механических испытаний цилиндрических образцов на разрыв показали, что по сравнению со сварными соединениями, выполненными дуговой сваркой, предел текучести и временное сопротивление разрыву металла шва

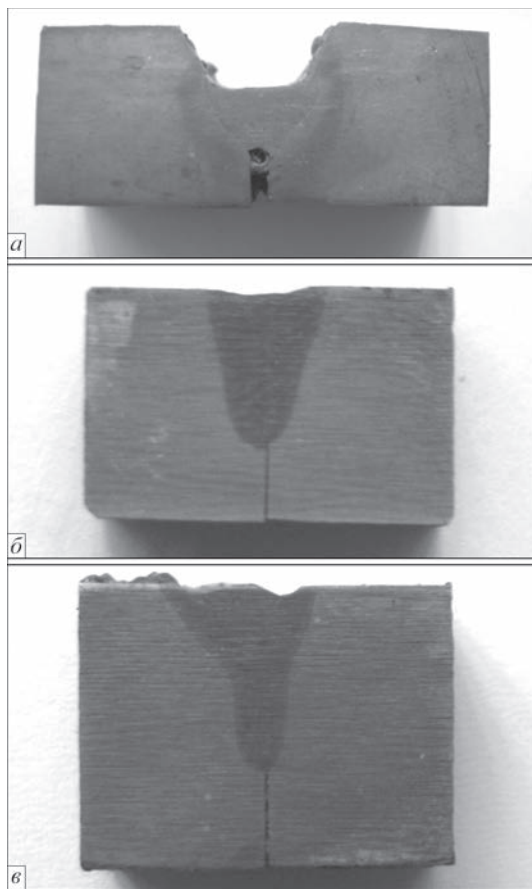


Рис. 4. Макрошлифы из жестких стыковых технологических проб стали S460M толщиной 8 мм ($B = 100$ мм): а — при автоматической дуговой сварке в смеси газов Ar + 18 % CO₂ порошковой проволокой Megafile 821R ($v_{св} = 30$ м/ч (8,3 мм/с)); б — лазерной сварке без присадочного материала ($v_{св} = 40$ м/ч (11,1 мм/с)); в — при гибридной лазерно-дуговой сварке указанной выше порошковой проволокой ($v_{св} = 72$ м/ч (20,0 мм/с))

сварных соединений стали S460M, выполненных с использованием лазерного процесса, увеличиваются практически в два раза. Однако при этом существенно снижается его пластичность: в два раза при скорости сварки 40 м/ч и практически в четыре раза при $v_{св} = 50$ м/ч. Ударная вязкость металла шва таких соединений вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сварным соединениям из сталей с $\sigma_{0,2} \geq 390$ МПа ($KCV_{-40} \geq 34$ Дж/см²). В то же время отмечено, что с увеличением скорости лазерной сварки показатели ударной вязкости металла шва сварных соединений стали S460M снижаются как при положительных, так и при отрицательных температурах. Ударная вязкость металла ЗТВ таких соединений находится на высоком уровне ($KCV_{-40} = 120...150$ Дж/см²), а ее значения в исследованном диапазоне скоростей сварки практически не изменяются.

При гибридной лазерно-дуговой сварке стали S460M наблюдается такая же тенденция изменения механических свойств металла шва, как и при лазерной сварке. Статическая прочность металла шва сварных соединений стали S460M увеличива-

ется по сравнению с дуговой сваркой на 65...70 %, однако его пластичность уменьшается практически в два раза.

Повышение скорости гибридной лазерно-дуговой сварки до 110 м/ч ($w_{6/5} = 58...63$ °C/с) приводит к снижению показателей прочности на 100 МПа и незначительному (на 15 %) повышению показателей пластичности (таблица). С повышением скорости гибридной лазерно-дуговой сварки от 72 (20,0 мм/с) до 110 м/ч (30,5 мм/с) ($w_{6/5} = 58...63$ °C/с) ударная вязкость металла шва при всех температурах испытаний уменьшается (KCV_{20} от 189 до 102 Дж/см², KCV_{-20} от 170 до 75 Дж/см² и KCV_{-40} от 118 до 63 Дж/см²).

Сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях стали S460M, выполненных с использованием дугового, лазерного и гибридного лазерно-дугового процессов сварки, оценивали с использованием технологической пробы «жесткая обварка» [13]. Контрольное сварное соединение имело ширину $B = 100$ мм, что соответствовало наибольшей жесткости закрепленных на плите пластин. В результате таких исследований установлено, что сварные соединения стали S460M, выполненные с использованием дугового, лазерного и гибридного лазерно-дугового процессов не склонны к образованию холодных трещин. Данный вывод был сделан на основании результатов анализа макрошлифов, изготовленных из технологических проб рис. 4, а–в. Он показал, что даже при сварке без предварительного подогрева холодные трещины в соединениях отсутствуют.

Кроме холодных трещин в сварном соединении могут встречаться и другие дефекты, такие как несплавления, поры, подрезы, шлаковые включения и т. п. При статической и циклической нагрузке они могут играть роль очага зарождения и развития трещин, которые при эксплуатации (особенно в условиях отрицательных температур) могут привести к хрупкому разрушению металла. Поэтому дальнейшая работа была направлена на оценку сопротивляемости металла шва и ЗТВ сварных соединений стали S460M хрупкому разрушению. Эти исследования проводились с использованием критериев механики разрушения. Для этих целей с использованием дугового процесса были сварены двухсторонние односторонние соединения стали S460M толщиной 10 мм с разделкой кромок, а с использованием гибридного лазерно-дугового процесса без разделки кромок. Дугую сварку таких соединений выполняли на скорости 30 м/ч, а гибридную лазерно-дугую на скорости 72 м/ч. Остальные технологические параметры режимов сварки указаны выше. Из указанных сварных соединений были изготовлены

Механические свойства сварных соединений стали S460M при дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке

Вариант сварки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV, Дж/см ² при T, °C					
					Шов			ЗТВ		
					20	-20	-40	20	-20	-40
Основной материал	490	600	24	59	110*					
Дуговая, $v_{св} = 30$ м/ч (8,3 мм/с)	576,3 587,3	623,6 626,3	22,3 23,3	69,7 68,0	186,0 172,1	121,7 153,7	69,8 83,4 80,9	-	-	83,3 109,4 90,7
Дуговая, $v_{св} = 40$ м/ч (11,1 мм/с)	586,0 608,9	629,6 637,7	21,7 23,3	69,8 69,9	176,2 173,9	158,3 134,8	93,3 80,1 113,9	-	-	107,1 73,6 88,6
Дуговая, $v_{св} = 50$ м/ч (13,9 мм/с)	606,4 608,3	658,1 656,7	21,0 23,0	68,0 69,9	174,8 185,7	149,0 167,9	161,1 145,2 136,9	-	-	120,8 120,2 115,2
Лазерная, $v_{св} = 40$ м/ч (11,1 мм/с)	998,8 996,0 997,4	1172,2 1151,4 1161,8	10,0 11,3	24,9 41,2	175,1 202,3	163,7 232,1 112,3	109,4 113,2 132,7	100,8 207,0	-	130,5 116,9 148,6
Лазерная, $v_{св} = 50$ м/ч (13,9 мм/с)	964,6 923,3 907,7	1123,1 1130,0 1068,3	5,3 6,7 4,0	19,5 19,5 18,5	154,2 87,6	57,2 85,2 54,2	46,0 102,5 42,3	150,0	-	167,5 132,1 157,2
Гибридная, $v_{св} = 72$ м/ч (20,0 мм/с)	861,3 795,1	1047,3 971,5	11,3 8,0	34,0 36,4	116,5 103,2	123,1 103,4 103,4	67,6 101,5 96,5	33,8 106,6 58,3	-	45,0 42,1 40,8
Гибридная, $v_{св} = 90$ м/ч (25,0 мм/с)	826,8 800,9	1033,5 1019,9	12,0 9,4	41,6 41,8	109,5 125,7	92,4 71,0 111,2	79,3 76,8 60,5	92,5 119,9 136,3	-	67,5 85,7 96,8
Гибридная, $v_{св} = 110$ м/ч (30,5 мм/с)	745,1 638,1	941,9 894,7	13,3 12,9	46,2 46,4	58,9 77,4	39,7 58,4 55,7	57,3 44,4 60,8	114,9 128,2 121,5	123,9 125,7 124,8	46,9 59,1 101,6

*Данные основного металла поперек проката

образцы сечением 20×10 мм для испытаний на трехточечный изгиб. Шевронный надрез на образцы наносился таким образом, чтобы устье выращенной от его вершины трещины находилось и в металле шва (часть образцов) и на линии сплавления соединения (другая часть образцов). Испытание образцов осуществляли при температурах -40, -20 °C и 20 °C. По результатам испытаний определяли критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} и критическое раскрытие трещины δ_C .

Анализ результатов выполненных исследований позволил установить следующее. Более высокой сопротивляемостью хрупкому разрушению отличаются сварные соединения стали S460M, выполненные дуговой сваркой. При температурах испытаний -40, -20 и 20 °C средние значения K_{IC} металла шва таких соединений составляют 86,3; 96,8 и 101 МПа√м, соответственно (рис. 5, а). По мере увеличения температуры испытаний показатели δ_C металла шва также увеличиваются от 0,08 и 0,09 мм при температурах -40 и -20 °C, соответственно, до 0,12 мм при температуре испытаний 20 °C (рис. 5, б).

Высокие, но существенно ниже по сравнению со швом, выполненным дуговой сваркой, показатели K_{IC} характерны для швов сварных соединений, изготовленных с использованием гибридной лазерно-дуговой сварки. По мере увеличения тем-

пературы испытания образцов, подготовленных из таких соединений, средние показатели K_{IC} увеличиваются от 52,2 МПа√м (температура испытаний

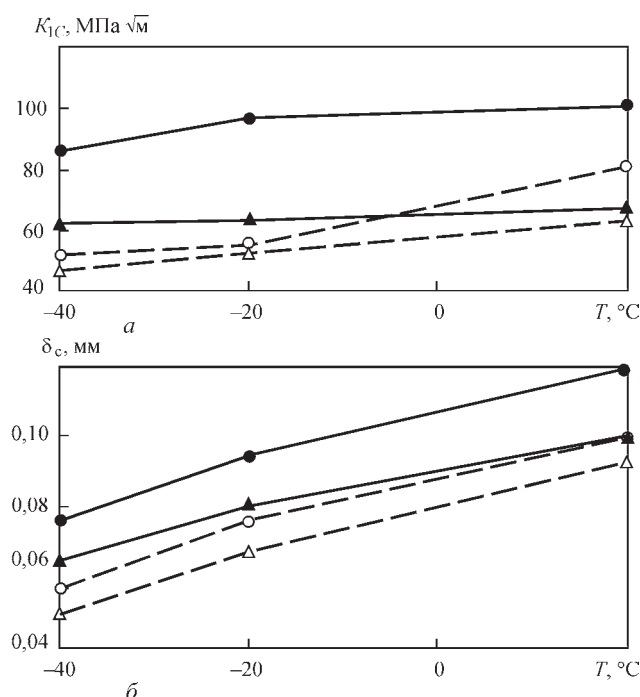


Рис. 5. Зависимость значений критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} (а) и критического раскрытия трещины δ_C (б) от температуры испытаний для металла швов (●, ○) и металла ЗТВ (▲, △) сварных соединений стали S460M $\delta = 8$ мм при дуговой автоматической (●, ▲) и гибридной лазерно-дуговой сварке (○, △)

–40 °С) до 55,4 и 81,2 МПа√м при температурах испытаний –20 и 20 °С, соответственно (рис. 5, а). Аналогичным образом изменяются и показатели δ_C металла шва от 0,067 мм и 0,076 мм при температурах –40, и –20 °С, соответственно, до 0,1 мм при температуре испытаний 20 °С (рис. 5, б).

Что касается металла ЗТВ сварных соединений исследуемой стали, то можно отметить следующее. При температуре испытаний 20 °С, значения показателей K_{1C} и δ_C металла ЗТВ сварных соединений, выполненных как дуговой, так и гибридной лазерно-дуговой сваркой, близки и соответственно составляют 65,6 МПа√м и 0,095 мм. В условиях испытаний при отрицательных температурах величины K_{1C} и δ_C металла ЗТВ сварных соединений, выполненных с использованием гибридной лазерно-дуговой сварки, на 22...32 % меньше, чем в сварных соединениях, изготовленных с применением дуговой сварки. Так, при температуре испытаний –20 °С показатели K_{1C} и δ_C металла ЗТВ сварных соединений, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, составляют 52,6 МПа√м и 0,057 мм, а дуговой сваркой — 63,3 МПа√м и 0,076 мм. При температуре испытаний образцов –40 °С показатели K_{1C} и δ_C металла ЗТВ составляют: $K_{1C} = 46,7$ МПа√м, $\delta_C = 0,05$ мм у сварных соединений, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, и 62,1 МПа√м, $\delta_C = 0,065$ мм, выполненных дуговой сваркой (рис. 5, а, б).

Отличаются сварные соединения стали S460M, выполненные с использованием дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварки, по сопротивляемости образованию трещин усталости. Об этом свидетельствуют результаты испытаний образцов на циклический консольный изгиб. Такие испытания проводились применительно к образцам размером 400×120×10 мм, изготовленным из стыковых соединений, дуговая и гибридная лазерно-дуговая сварка которых осуществлялась в защитной газовой смеси 82 % Ar+18 % CO₂ проволокой Megafil 821R диаметром 1, мм на режимах, аналогичных режимам, на которых выполнялись соединения для испытаний на хрупкое разрушение. Испытания образцов при симметричном циклическом нагружении проводили с частотой цикла 14 Гц. Напряжение цикла изменялось от 40 до 80 МПа с шагом 20 МПа. В результате проведенных исследований установлено, что более высокую стойкость к образованию трещин усталости имеют сварные соединения, выполненные дуговой сваркой. При указанных условиях нагружения образование усталостных трещин в сварных соединениях, выполненных с использованием дуговой сварки, не наблюдалось после $N = 2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Трещины усталости глубиной 3 мм были выявлены только

в сварных соединениях, выполненных с использованием гибридного лазерно-дугового процесса при напряжениях цикла 60 и 80 МПа. Так, в образцах, которые испытывались при напряжении цикла 60 МПа, они начали образовываться после 1540400 циклов нагружения, а при $\sigma = 80$ МПа — после $N = 1300680$ циклов нагружения.

Выводы

Увеличение скорости дуговой сварки в защитных газах до $v_{св} = 50$ м/ч (13,9 мм/с) ($w_{6/5} = 36$ °С/с) позволяет получить качественный шов в сварных соединениях высокопрочной легированной стали S460M с пределом текучести $\sigma_T = 480$ МПа с повышенными показателями статической прочности и ударной вязкости.

При лазерной сварке с повышением скорости охлаждения $w_{6/5}$ сварных соединений стали S460M снижаются показатели пластичности и ударной вязкости металла шва. Это связано с образованием мартенситной закалочной структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений, которая образуется в результате характерного для лазерной сварки интенсивного охлаждения металла в интервале температур 600...500 °С ($w_{6/5} = 65...103$ °С/с).

Применение гибридной лазерно-дуговой сварки стали S460M позволяет существенно повысить линейную скорость сварки по сравнению с дуговым и лазерным процессами. При этом обеспечивается снижение скорости охлаждения металла швов и ЗТВ по сравнению с лазерным способом сварки. В совокупности это позволяет существенно повысить производительность процесса сварки и сохранить при этом показатели механических свойств и ударной вязкости металла швов и ЗТВ сварных соединений на уровне требований, предъявляемых к сварным конструкциям, изготавливаемым из сталей класса прочности S440...S490.

Установлено, что сварные соединения стали S460M, выполненные с использованием дугового, лазерного и гибридного лазерно-дугового процессов, не склонны к образованию холодных трещин.

Повысить показатели вязкости разрушения соединений при гибридной лазерно-дуговой сварке возможно за счет формирования в металле ЗТВ структуры нижнего бейнита, что достигается при скорости сварки 72 м/ч.

Показано, что более высокую долговечность имеют стыковые соединения стали S460M, выполненные дуговым способом сварки. При гибридной лазерно-дуговой сварке повысить сопротивляемость усталостному разрушению можно при условии выполнения в соединениях разделки кромок с небольшим углом раскрытия до 10°.

Список литературы

- Одесский П. Д., Молодцов А. Ф., Морозов Ю. Д. (2011) Новые эффективные низколегированные стали для строительных металлических конструкций. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, 5, 20–25.
- Билик А. С., Курашев Р. В., Горбатенко В. В., Коновалов Г. Н. (2013) Применение термомеханически упрочненного листового проката в сварных металлических конструкциях. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, 4, 2–5.
- Позняков В. Д., Жданов С. Л., Завдоев А. В. и др. (2016) Свариваемость высокопрочной микролегированной стали S460M. *Автоматическая сварка*, 2, 23–30.
- Ufua E. (2013) Elevated temperature mechanical properties of butt welded connections made with high strength steel grades S355 and S460M. Design, Fabrication and Economy of Metal Structures. *International Conference Proceedings, Miskolc, Hungary, April 24–26*, 407–412.
- Grigoryants A. G., Grezev V. A. (2015) Special features of laser welding using fibre and CO₂ lasers. *Welding International*, 29, 2, 968–973.
- Markovits T., Takács J. (2010) Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser. *Physics Procedia*, 5, Part B, 47–52.
- Moore P. L., Howse D. S., Wallach E. R. (2004) Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 9, 4, 314–322.
- Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж. (2010) Особенности применения гибридной лазерной-дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, 6, 38–47.
- Atabak M., Ma J., Yang G., Kovacevic R. (2014) Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials and Design*, 64, 573–587.
- Gu X. Y., Duan Z. Z., Gu X. P. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of laser-MAG hybrid welded thick-section weathered steel joint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 5, 825–831.
- Cao X., Wanjara P., Huang J. et al. (2011) Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel. *Materials & Design*, 32, 6, 3399–3413.
- Kelly S. M., Brown S. W., Tressler J. F. et al. (2009) Using Hybrid Laser-Arc Welding to Reduce Distortion in Ship Panels. *Welding Journal*, 88(3), P. 32–36.
- Позняков В. Д., Шелягин В. Д., Жданов С. Л. и др. (2015) Лазерно-дуговая сварка высокопрочных сталей с пределом текучести более 700 МПа. *Автоматическая сварка*, 10, 20–25.
- Berdnikova O., Poznyakov V., Bushma O. (2016) Laser and Hybrid Laser-Arc Welding of High Strength Steel N-A-XTRA-70. *Materials Science Forum*, 870, P.630–635.
- Berdnikova O., Sydoretz V., Alekseenko T. (2014) Structure and Properties of Laser-Welded Joints from High-Strength Steels. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 240–245.
- Григоренко Г. М., Позняков В. Д., Зубер Т. А., Костин В. А. (2017) Особенности формирования структуры сварных соединений микролегированной конструкционной стали S460M. *Автоматическая сварка*, 10, 9–16.

References

- Odessky, P.D., Molodtsov, A.F., Morozov, Yu.D. (2011) New effective low-alloy steels for building metallic structures. *Montazhnye i Spetsialnye Raboty v Stroitelstve*, 5, 20-25 [in Russian].
- Bilyk, A.S., Kurashev, R.V., Gorbatenko, V.V. et al. (2013) Application of thermomechanically hardened rolled sheet in welded metallic structures. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, 4, 2-5 [in Russian].
- Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Zavdoveev, A.V. et al. (2016) Weldability of high-strength microalloyed steel S460M. *The Paton Welding J.*, 2, 21-28.
- Ufua, E. (2013) Elevated temperature mechanical properties of butt welded connections made with high-strength steel grades S355 and S460M. In: *Proc. of Int. Conf. on Design,*

- Fabrication and Economy of Metal Structures (Miskolc, Hungary, April 24-26, 2013)*, 407-412.
- Grigoryants, A.G., Grezev, V.A. (2015) Special features of laser welding using fibre and CO₂ lasers. *Welding Intern.*, 29(2), 968-973.
- Markovits, T., Takacs, J. (2010) Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser. *Physics Procedia*, 5, Pt B, 47-52.
- Moore, P.L., Howse, D.S., Wallach, E.R. (2004) Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels. *Sci. and Technology of Welding and Joining*, 9(4), 314-322.
- Kah, P., Salminen, A., Martikainen, J. (2010) Laser-arc hybrid welding processes (Review). *The Paton Welding J.*, 6, 32-40.
- Atabak, M., Ma, J., Yang, G., Kovacevic, R. (2014) Hybrid laser/arc welding of advanced high-strength steel in different butt joint configurations. *Materials & Design*, 64, 573-587.
- Gu, X.Y., Duan, Z.Z., Gu, X.P. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of laser-MAG hybrid welded thick-section weathered steel joint. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 81(5), 825-831.
- Cao, X., Wanjara, P., Huang, J. et al. (2011) Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high-strength low-alloy steel. *Materials & Design*, 32(6), 3399-3413.
- Kelly, S.M., Brown, S.W., Tressler, J.F. et al. (2009) Using hybrid laser-arc welding to reduce distortion in ship panels. *Welding J.*, 88(3), 32-36.
- Poznyakov, V.D., Shelyagin, V.D., Zhdanov, S.L. et al. (2015) Laser-arc welding of high-strength steels with yield strength of more than 700 MPa. *The Paton Welding J.*, 10, 19-24.
- Berdnikova, O., Poznyakov, V., Bushma, O. (2016) Laser and hybrid laser-arc welding of high strength-steel N-A-XTRA-70. *Mat. Sci. Forum*, 870, 630-635.
- Berdnikova, O., Sydoretz, V., Alekseenko, T. (2014) Structure and properties of laser-welded joints from high-strength steels. *Appl. Mech. Mater.*, 682, 240-245.
- Grigorenko, G.M., Poznyakov, V.D., Zuber, T.A. et al. (2017) Peculiarities of formation of structure in welded joints of microalloyed structural steel S460M. *The Paton Welding J.*, 10, 2-8.

В. Д. Позняков, В. Д. Шелягин, С. Л. Жданов,
А. В. Бернацкий, А. О. Максименко, О. В. Сіора

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

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДУГОВОГО, ЛАЗЕРНОГО ТА ГІБРИДНОГО СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ S460M

В роботі вивчено вплив параметрів дугового, лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури і властивостей металу швів і зони термічного впливу стикових зварних з'єднань високоміцної легованої сталі S460M з межею текучості до 480 МПа. Показано, що збільшення швидкості дугового зварювання в захисних газах до 50 м/год (13,9 мм/с) дозволяє отримати якісний шов з підвищеними показниками статичної міцності і ударної в'язкості. При лазерному зварюванні з підвищенням швидкості охолодження знижуються показники пластичності і ударної в'язкості металу шва, що пов'язано з утворенням мартенситної гартівної структури в шві металів і зони термічного впливу зварних з'єднань, яка з'являється при більш високій швидкості охолодження. Застосування способу гібридного лазерно-дугового зварювання сталі S460M дозволяє знизити швид-

кість охолодження металу швів і зони термічного впливу в порівнянні з лазерним способом зварювання, завдяки чому забезпечується високий рівень механічних властивостей і ударної в'язкості металу цих зон. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: стикові з'єднання, високоміцна сталь, дугове зварювання, лазерне зварювання, гібридне лазерно-дугове зварювання, термічний цикл, особливості структури, механічні властивості

Effect of parameters of arc, laser and hybrid methods of welding on structure and properties of butt joints of high-strength steel S460M

V. D. Poznyakov, V. D. Shelyagin, S. L. Zhdanov,
A. V. Bernatskii, A. A. Maksymenko and A. V. Siora

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

The paper studies the effect of parameters of arc, laser and hybrid laser-arc welding on formation of structure and properties of weld metal and heat affected zone of butt joints from high-strength low alloy steel S460M with yield limit up to 480 MPa. It is shown that increase of rate of gas-shielded arc welding to 50 m/h (13.9 mm/s) allows receiving a quality weld with increased indices of static strength and impact toughness. Laser welding with increased cooling rate provokes reduction of indices of ductility and impact toughness of weld metal that is related with formation of martensite hardening structure of weld metal and heat affect zone of the welded joints revealing at high cooling rate. Application of method of hybrid laser-arc welding of steel S460M allow decreasing cooling rate of weld metal and heat affected zone in comparison with laser welding method. This provides high level of mechanical properties and impact toughness of metal of these zones. 16 Ref. 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: butt joints, high-strength steel, arc welding, laser welding, hybrid laser-arc welding, thermal cycle, structure peculiarities, mechanical properties

Поступила в редакцию 27.11.2017



Ярмарки «Проволока 2018» и Трубы 2018» — больше, чем когда-либо!

16-20 апреля 2018 г., Messe Düsseldorf,
г. Дюссельдорф, Германия

За четыре месяца до начала торговых ярмарок выставочный центр Дюссельдорфа получил многочисленные заявки на участие, больше, чем когда-либо ранее. Это связано с успешной историей этих ярмарок, продолжительность которой насчитывает более 30 лет.

Характерно, что на сегодня уже зарезервирована площадь в 120000 м², что на 10000 м² больше, чем площадь для двух торговых ярмарок в 2016 г.

Число зарегистрированных экспонентов для ярмарки «Проволока 2018» в настоящее время составляет 1180, они будут представлять 50 стран. Площадь ярмарки «Трубы 2018» составляет более 52000 м², на ней будут размещены 965 экспонентов из 53 стран.

Как и прежде, два события в Дюссельдорфе наглядно демонстрируют свои ведущие позиции среди мировых ярмарок в своих отраслях. Инновационные технологии, новые машины и оборудование, а также продукты и услуги из проволоочной, кабельной и трубной промышленности будут представлены в течение пяти дней.

На ярмарке «Проволока 2018» будут представлены машины для производства проволоки, инструменты и вспомогательные материалы для технологических процессов, а также материалы, специальные провода и кабели. Ярмарка также будет посвящена инновациям в области техники измерения и контроля, испытательной техники и целым рядом специализированных областей.

В 2018 г. будет уделено еще больше внимания, чем раньше, потенциалу технологии стекловолокон. Стекловолокно является более эффективным, скоростным и часто более надежным, чем обычные материалы. Таким образом, Messe Düsseldorf реагирует на все более широкое использование стекловолоконных технологий в энергетическом секторе, а также в строительной и коммуникационной отраслях применения.

Ярмарка «Трубы 2018» будет представлена в павильонах от 3 до 7,0, 7а, 16 и 17, а также частично во временном павильоне 18. В ассортименте представленных продуктов будут машины и оборудование для производства и обработки труб, а также сырья и аксессуаров, поддержанные машины, технологические инструменты, вспомогательные ресурсы и измерительное, контрольное и испытательное оборудование. Кроме того, линейка оборудования будет включать трубопроводы, профили и пластиковые трубы.

Постоянный интерес со стороны Китая позволил снова создать китайский павильон. Китайские компании из проволоочной, кабельной и трубной промышленности будут совместно представлены в зале 16 под лозунгом «Знакомство с китайской экспертизой».

Актуальную информацию о двух торговых ярмарках
можно найти на веб-сайтах: www.wire.de и www.tube.de



РЕЗИСТОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВАРКИ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ СВАРОЧНЫХ СИСТЕМ

Л. М. ЛОБАНОВ¹, Н. М. МАХЛИН², А. Е. КОРОТЫНСКИЙ¹, В. Ю. БУРЯК², А. Г. СИПАРЕНКО²

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

²ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

Рассмотрены некоторые теоретические вопросы резистометрического способа определения координат пятна сварочной дуги и оценивания скорости перемещения электрода при осуществлении или имитации дуговой сварки, а также особенности построения аппаратной части и программного обеспечения тренажерных сварочных систем с использованием этого способа. Приведены примеры использования этого метода в разработанных и промышленно изготавливаемых в ГП «Научно-инженерный центр сварки и контроля в отрасли атомной энергетики Украины Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины» (НИЦ СКАЭ) аппаратно-программных комплексах (сварочных тренажерах), а также основные варианты схмотехнического построения устройств для реализации в тренажерных сварочных системах резистометрического способа. Библиогр. 17, рис. 4.

Ключевые слова: координаты пятна дуги, скорость сварки, тренажерные сварочные системы, имитатор свариваемого изделия, устройства контроля скорости сварки, датчики сварочного тока, «токовая петля»

В процессе развития работ по созданию тренажерных сварочных систем (ТСС) были предложены различные способы оценки скорости сварки и устройства, реализующие эти способы [1–3]. По мнению многих авторов, для оценки скорости сварки в дуговых ТСС наиболее приемлемы технические средства, использующие видеосенсоры [4], устройства акустической локации [5], приемники оптического [6–8] или теплового излучения [1, 9, 10].

Очевидно, что применение видеосенсоров обеспечивает измерение скорости сварки с высокой точностью, однако на сегодня при этом возрастает сложность и стоимость аппаратных и программных средств ТСС, что в подавляющем большинстве случаев экономически неоправданно.

Использование методов акустической локации в дуговых ТСС (особенно в малоамперных) сильно затруднено из-за низкого уровня полезных сигналов имитатора дуги [11] и поэтому малоперспективно.

Для устройств контроля скорости сварки (УКСС), построенных с применением дискретных чувствительных элементов, воспринимающих оптическое излучение видимого или инфракрасного диапазона от перемещающейся дуги, характерна зависимость от оптического состояния окружающей среды, а для УКСС на базе термодатчиков — зависимость от геометрической формы окружающей тел и расстояния от них до термодатчиков, а также от температуры и теплопроводности окружающей среды. Кроме сравнительно невысокой точности измерений к недостаткам УКСС, выпол-

ненных на приемниках оптического или теплового излучения, следует отнести необходимость схемно-конструктивных усложнений как аппаратного интерфейса ТСС, так и входящих в нее манипулятора-позиционера и имитаторов сварочных инструментов или свариваемого изделия.

Анализ возможностей известных способов УКСС и все более возрастающих технологических и дидактических требований к дуговым ТСС показывает, что большинство известных и существующих УКСС уже далеко не в полной мере соответствуют этим требованиям.

Между тем, в дуговых ТСС вполне удовлетворительные результаты могут быть достигнуты с помощью сравнительно легко осуществимого резистометрического способа определения координат перемещающейся дуги и оценивания скорости сварки. В основу этого способа положен разработанный В. В. Васильевым и Л. А. Симак в Институте проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины метод определения координат измерительного зонда в проводящей среде [12, 13], в дальнейшем получивший развитие в ИЭС им. Е. О. Патона и НИЦ СКАЭ для систем мониторинга процессов дуговой сварки и ТСС применительно к перемещающемуся пятну сварочной дуги или ее имитатора.

Сущность резистометрического способа поясняется с помощью рис. 1.

Типичный для ТСС имитатор свариваемого изделия (ИСИ) представляет собой стальную пластину прямоугольной формы, длина которой l_0 , ширина d_0 и толщина δ_0 , причем $\delta_0 \ll d_0 \ll l_0$.

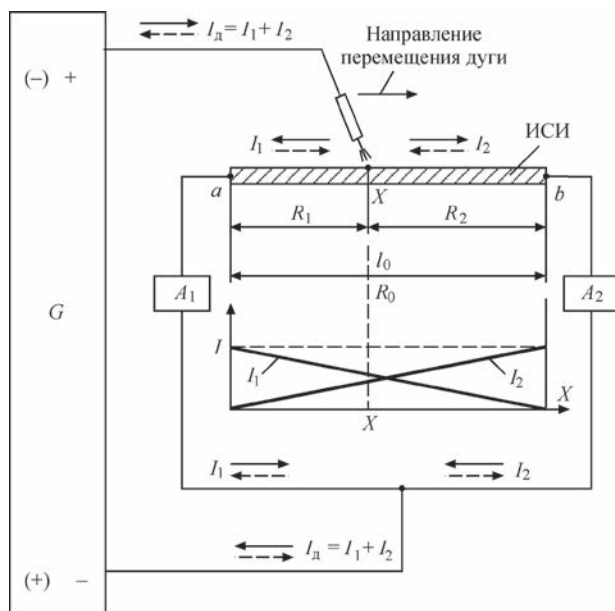


Рис. 1. Схема резистометрического способа определения координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки в ТСС (описание см. в тексте; A_1, A_2 — датчики тока в ветвях $сaх$ и $сbх$ сварочного контура)

Один из выходных полюсов сварочного источника питания G подключен к точке соединения двух ветвей (ac и bc), каждая из которых второй точкой подсоединена к одному из двух токоподводов (a или b) на противоположных торцевых сторонах ИСИ. Второй выходной полюс сварочного источника питания соединен с токоподводом имитатора сварочного инструмента (электрододержателя).

При использовании сварочного источника в режиме источника (стабилизатора) тока, характеризующегося «штыковой» внешней вольт-амперной характеристикой (что имеет место в большинстве ТСС), сварочный ток I_d не зависит от падений напряжения на дуге, в ИСИ, в проводах и токоподводах сварочной цепи.

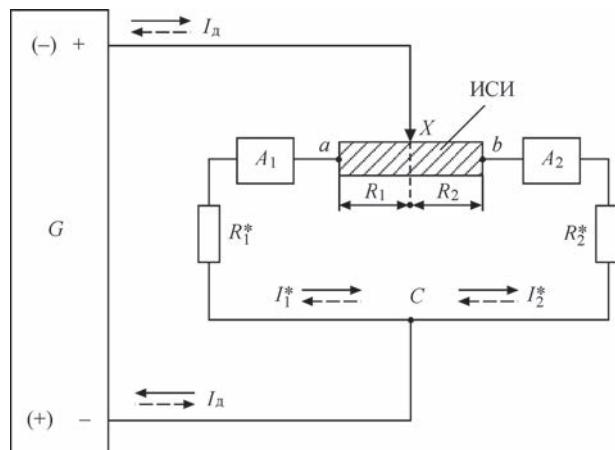


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема сварочного контура ТСС (описание см. в тексте)

Из очевидного равенства $R_0 = R_1 + R_2$ (где R_0 — электрическое сопротивление ИСИ; R_1, R_2 — сопротивления его участков $ах$ и $bх$, соответственно) и предположения о неизменности сечения ИСИ по всей его длине l_0 вытекает, что координата x дугового пятна на ИСИ определяется соотношением:

$$x = l_0 R_1 / R_0 = l_0 (1 - R_2 / R_0). \quad (1)$$

В соответствии с законами Кирхгофа и при допущениях о том, что электрические сопротивления ИСИ и его отдельных участков в процессе сварки остаются неизменными, а электрические сопротивления ветвей ac и bc равны между собой и пренебрежительно малы по сравнению со сопротивлением ИСИ, для участков $сах$ и $сbх$ справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_d \\ I_1 R_1 = I_2 R_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где I_1, I_2 — токи, протекающие через участки $сах$ и $сbх$, соответственно.

Решением системы уравнений (2) с учетом выражения (1) являются соотношения:

$$I_1 = I_d (1 - x / l_0), \quad (3)$$

$$I_2 = I_d x / l_0, \quad (4)$$

из которых получаем выражение для координаты пятна дуги x :

$$x = l_0 (1 - I_1 / I_d) = l_0 I_2 / I_d, \quad (5)$$

а из него — выражение для скорости перемещения дуги (скорости сварки) V_c :

$$V_c = dx/dt = l_0 / I_d (-dI_1/dt) = l_0 / I_d dI_2/dt. \quad (6)$$

Таким образом, решение задачи по оценке скорости сварки в ТСС сводится к определению изменений во времени токов в ветвях, которыми ИСИ подключен к одному из выходных полюсов сварочного источника питания.

Реальные соединения ИСИ со сварочной цепью выполняются проводниками, имеющими конечную длину и определенное сечение, а значит, обладающими омическим сопротивлением.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема сварочного контура, в которой под резисторами R_1^* и R_2^* подразумеваются активные сопротивления ветвей ac и bc . Очевидно, что с учетом R_1^* и R_2^* система уравнений для участков $сах$ и $сbх$ имеет вид:

$$\begin{cases} I_1^* + I_2^* = I_d \\ I_1^* (R_1 + R_1^*) = I_2^* (R_2 + R_2^*) \end{cases}, \quad (7)$$

где I_1^*, I_2^* — токи через реальные участки $сах$ и $сbх$.

Решая систему уравнений (7), получим выражения:

для токов I_1^*, I_2^* :

$$I_1^* = \frac{I_d (R_2 + R_2^*)}{R_0 + R_1^* + R_2^*}, \quad (8)$$

$$I_2^* = \frac{I_d (R_1 + R_1^*)}{R_0 + R_1^* + R_2^*}, \quad (9)$$

для координаты пятна дуги:

$$\begin{aligned} x^* &= l_0 \left[\left(1 + \frac{R_2^*}{R_0} \right) - \frac{I_1^*}{I_d} \left(1 + \left(R_1^* + \frac{R_2^*}{R_0} \right) \right) \right] = \\ &= l_0 \left[\frac{I_2^*}{I_d} \left(1 + \left(R_1^* + \frac{R_2^*}{R_0} \right) - \frac{R_1^*}{R_0} \right) \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

для скорости сварки:

$$\begin{aligned} V_c^* &= \frac{l_0}{I_d} \left(1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0} \right) \left(-\frac{dI_1^*}{dt} \right) = \\ &= \frac{l_0}{I_d} \left(1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0} \right) \frac{dI_2^*}{dt}. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом:

$$\frac{dI_1^*}{dt} = \left(\frac{1}{1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0}} \right) \frac{dI_1}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{dI_2^*}{dt} = \left(\frac{1}{1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0}} \right) \frac{dI_2}{dt}. \quad (13)$$

Выполнив простые преобразования с подстановкой выражений (8) и (9) в (10), а выражений (12) и (13) в (11), легко убедиться, что $x^* = x$, а $V_c^* = V_c$, и, следовательно, активные сопротивления R_1^* и R_2^* ветвей ac и bc сварочного контура влияния на определение координаты пятна дуги и скорости сварки не оказывают. Вместе с тем из выражений (8), (9), (12) и (13) следует, что от значения отношения $(R_1^* + R_2^*)/R_0$ зависят значения токов I_1^* , I_2^* и их производных dI_1^*/dt и dI_2^*/dt .

От отношения $(R_1^* + R_2^*)/R_0$ существенно зависит и важная для реализации резистометрического способа характеристика, которая может быть названа чувствительностью по току E_i и определена через значения токов I_1^* , I_2^* на единицу длины ИСИ по выражению

$$E_i = \frac{I_d}{l_0} \left(\frac{1}{1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0}} \right). \quad (14)$$

В процессе проведенных в ИЭС совместно с НИЦ СКАЭ экспериментальных и технологических работ была исследована зависимость $E_{отн} = f(k_R)$, причем под относительной чувствительностью $E_{отн}$ понимается отношение E_i/E_{i0} , где E_{i0} — чувствительность при $R_1^* = R_2^* = 0$, а $k_R = 1 + (R_1^* + R_2^*)/R_0$. При этом установлено, что зависимость $E_{отн} = f(k_R)$ имеет гиперболический характер и наиболее резко выражена при $k_R < 1,2$.

В реальных ТСС, как правило, $k_R > 1,2$, что обуславливает возможность рационального выбора сечений и массы проводов ветвей сварочного контура. Так, например, в малоамперном дуговом тренажере сварщика МДТС-05М1 в качестве ИСИ используется пластина из низкоуглеродистой стали (в частности, Ст3), рабочая длина которой $l_0 = 360$ мм, а $R_0 = 0,45$ мОм. Длина проводника каждой из ветвей ac и bc сварочного контура составляет 0,45 м. При сечении медного проводника каждой ветви 30 мм² активное сопротивление $R_1^* = R_2^* = 0,17$ мОм, $k_R = 1,46$ и (при сварочном токе $I_d = 4,5$ А) $E_i = 6,84$ мА/мм.

Оценку точности измерения скорости сварки резистометрическим способом с учетом влияния R_1^* и R_2^* можно провести, определив среднеквадратичную погрешность $\sigma_{отн}$ по выражению

$$\begin{aligned} \sigma_{отн} &= \frac{dV_c^*}{V_c} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{dl_0}{l_0} \right)^2 + \left(\frac{dR_1^*}{R_0 + R_1^* + R_2^*} \right)^2 +} \\ &\quad + \left(\frac{R_1^* + R_2^*}{R_0 + R_1^* + R_2^*} \right)^2 + \left(\frac{dR_0}{R_0} \right)^2 + \left(\frac{dI_d}{I_d} \right)^2 + \left(\frac{di}{i} \right)^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где dV_c^* — дифференциал функции V_c^* ; $i = dI_1^*/dt$ или $i = dI_2^*/dt$; $di = d(dI_1^*/dt)$ или $di = d(dI_2^*/dt)$.

Поскольку в выражении (15) слагаемые, содержащие R_0 , R_1^* , R_2^* , как показывает численный анализ, пренебрежительно малы, то формула для определения $\sigma_{отн}$ с достаточно точным приближением может быть представлена в виде

$$\sigma_{отн} = \sqrt{\left(\frac{dl_0}{l_0} \right)^2 + \left(\frac{d(I_1^* + I_2^*)}{I_1^* + I_2^*} \right)^2 + \left(\frac{di}{i} \right)^2}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет сделать вывод о том, что погрешность измерения V определяется погрешностями измерений l_0 , I_1^* , I_2^* , dI_1^*/dt или dI_2^*/dt , которые, в свою очередь, зависят от точностных характеристик соответствующих инструментов и измерительных устройств.

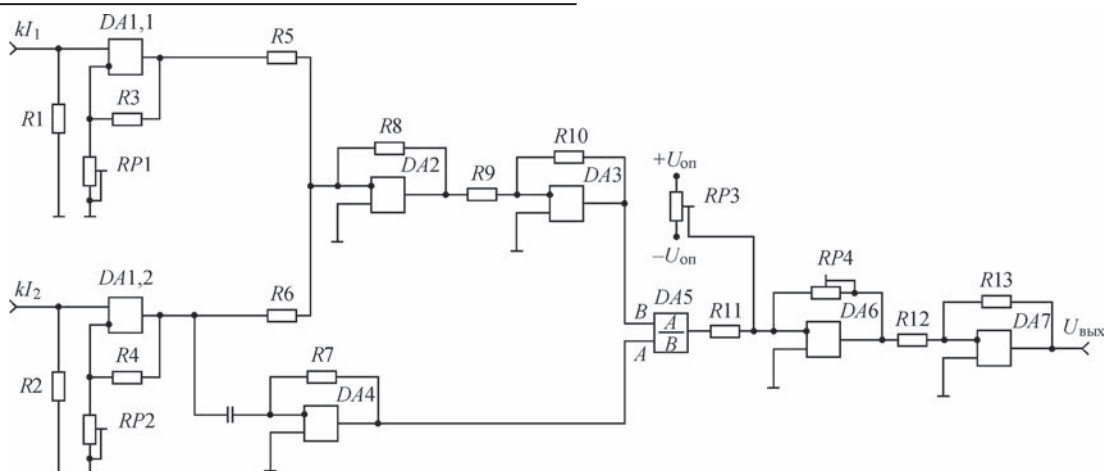


Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема одного из вариантов построения аналогового УКСС

Реализация резистометрического способа может быть осуществлена с помощью аналоговых или цифровых УКСС.

К достоинствам аналоговых УКСС следует отнести сравнительную простоту схемотехнических решений и алгоритмов их работы, высокое быстродействие, возможность использования элементной базы массового применения, относительно невысокую стоимость, а к недостаткам — ограниченную точность дифференцирования сигналов, отражающих изменения координаты пятна дуги и необходимость периодических подрегулировок для компенсации дрейфа нулевых значений выходных сигналов операционных усилителей и инструментальных перекалибровок при изменении начальных условий (размеров ИСИ, значений тока дуги I_d и т. п.).

На рис. 3 приведена упрощенная электрическая схема одного из возможных вариантов построения аналогового УКСС. Устройство содержит входной масштабирующий усилитель DA1, также выполняющий функцию масштабирования сумматор DA2, функциональный делитель DA5, инвертирующий усилитель DA3, дифференцирующий усилитель DA4 и реализующие функцию $U_{\text{вых}} = k(AU_{\text{вх}})$, где k и A — коэффициенты пропорциональности и масштабирования соответственно, выходные усилители DA6 и DA7. Подстроечные резисторы RP1 и RP2 служат для подрегулирования устройства, а резисторы RP3 и RP4 — для его калибровки. Уровни выходных сигналов устройства, отображающих координату пятна дуги x^* и скорости сварки V_c^* , выбираются исходя из требуемого диапазона стандартных сигналов, например, $\pm (0 \dots 5)$ В или $\pm (0 \dots 10)$ В.

По сравнению с аналоговыми цифровые УКСС обеспечивают значительно более высокую помехоустойчивость и точность измерений, возможность оперативного изменения программными средствами алгоритма работы и выполнения калибровок и подстроек, стабильность параметров в приемлемом диапазоне изменений воздействи-

ющих климатических факторов внешней среды. Вместе с тем, поскольку в состав цифровых УКСС входит такой сложный по внутренней структуре и относительно дорогостоящий функциональный узел, как аналого-цифровой преобразователь (АЦП), стоимость цифровых УКСС существенно превышает стоимость аналоговых устройств.

Структурная схема варианта цифрового УКСС приведена на рис. 4. В состав устройства входят нормирующие усилители DA1.1, DA1.2 и АЦП DA4. Для повышения помехоустойчивости АЦП в устройство введены активные фильтры нижних частот с единичным усилением DA2 и DA3. Нормирующие усилители DA1.1 и DA1.2 обеспечивают поступление на аналоговые входы АЦП сигналов в регламентируемом диапазоне уровней, например, $\pm (0 \dots 1,25)$ В или $\pm (0 \dots 2,5)$ В. Тип АЦП выбирается из условий его совместимости с персональным компьютером (ПК), в том числе по уровням выходных сигналов АЦП и программному обеспечению. При этом необходимо отметить,

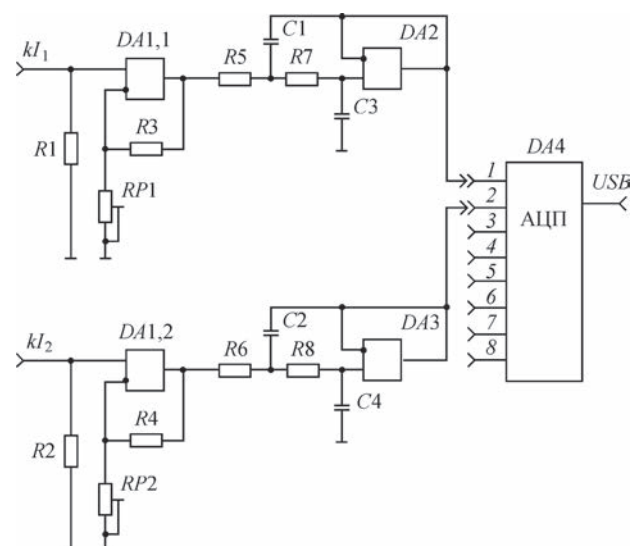


Рис. 4. Упрощенная электрическая принципиальная схема одного из вариантов построения цифрового УКСС

что поскольку практически любой АЦП, предназначенный для ввода информации в ПК, имеет не менее восьми входных аналоговых каналов, то он может быть использован не только для ввода информации о координате пятна дуги и скорости сварки, но и о напряжении (длине) дуги, об угловых положениях электрода имитатора сварочного инструмента и о других параметрах, характеризующих процесс тренажа или тестирования.

И аналоговые, и цифровые УКСС должны обеспечивать их калибровку, учитывающую начальные условия — геометрические размеры ИСИ, активные сопротивления проводов и переходные сопротивления контактных соединений ветвей сварочной цепи, влияние фактора k_R , чувствительность E_i . Калибровка аналоговых УКСС более трудоемка и требует применения дополнительной измерительной аппаратуры, для калибровки цифровых УКСС достаточно программных средств.

Обязательными сенсорными компонентами как аналоговых, так и цифровых УКСС являются два идентичных датчика тока, которые должны иметь линейную передаточную характеристику (коэффициент нелинейности $\leq 0,5\%$) во всем диапазоне возможных изменений сварочного тока вне зависимости от его формы и полярности, высокой точностью (приведенная погрешность не более $\pm 1\%$), широким динамическим и частотным диапазоном (полоса пропускания не менее 50 кГц), стойкостью к воздействию наводок и помех, всегда имеющих место при дуговой сварке. Кроме того, датчики должны обеспечивать гальваническую развязку входных и выходных цепей и не вносить заметных дополнительных сопротивлений в сварочный контур. Применительно к дуговым ТСС этим требованиям в наибольшей степени соответствуют датчики на основе эффекта Холла, включая датчики тока, серийно изготавливаемые рядом фирм, в том числе фирмы LEM (Швейцария) и ООО «ЛЕМ Россия» (РФ) — например, датчики тока LAN25-NP с погрешностью измерения тока $\pm 0,3\%$, ПАО «ЧЕЗАРА» (Украина) — например, датчики тока ДИТ-50М, ДСТ-250, ДСТ-500 с погрешностью измерения $\pm 0,1\%$. Такие датчики тока имеют потенциальный или токовый выход. Последний позволяет формировать связь между информационным выходом датчика и входным усилителем УКСС в виде «токовой петли» и тем самым существенно повысить помехоустойчивость устройства, однако в этом случае входные каскады УКСС должны быть выполнены по схеме преобразователя «ток — напряжение».

В ИЭС совместно с НИЦ СКАЭ были проведены эксперименты по проверке точности цифровых УКСС, входящих в состав компьютеризированных малоамперного дугового тренажера

сварщика МДТС-05М1 и тренажера сварщика дуговой сварки ТСДС-06М. Для перемещения с заданной скоростью неплавящегося электрода вдоль неподвижно закрепленного ИСИ использовали механизм установки, собранной на базе автомата АДСВ-6 для аргонодуговой сварки. Источником питания дуги в случае МДТС-05М1 служил модуль силовой сварочный МСС-05 этого тренажера, функционирующий в режиме источника тока и обеспечивающий сварочный ток $(4,5 \pm 0,3)$ А во всем технологически обоснованном диапазоне длины дуги, а в случае ТСДС-06М — энергетический модуль на базе универсального сварочного инвертора «ПРОФИ TIG 200», также функционирующий в режиме источника тока и обеспечивающий сварочный ток 80, 100, 120, 140, 160 и 180 А с точностью ± 5 А. В качестве ИСИ в случае применения МДТС-05М1 использовали пластину из Ст3, общая длина которой 440 мм (рабочая длина $l_0 = 360$ мм), ширина 40 мм, толщина 2 мм, а в случае применения ТСДС-06М — пластину из такой же стали, общая длина которой 470 мм (рабочая длина $l_0 = 390$ мм), ширина 60 мм, толщина 10 мм. Сварку выполняли при постоянной скорости перемещения неплавящегося электрода (номинальным диаметром 2,0 мм в случае МДТС-05М1 и 3,0 мм в случае ТСДС-06М) 2, 5 и 8 мм/с, при каждом фиксированном значении скорости сварки после каждого прохода (протяженностью 360 и 390 мм, соответственно) осуществляли проход дуги в обратном направлении. Каждый эксперимент повторяли не менее пяти раз. Значения скорости сварки, полученные с помощью системы УКСС — ПК тренажеров МДТС-05М1 и ТСДС-06М, сравнивали со значениями скорости перемещения электрода, контролируемые приборами (в частности, амперметрами типа М42100) упомянутой выше экспериментальной установки с погрешностью, не превышающей $\pm 1,5\%$. Статистической обработкой результатов экспериментов установлено, что относительная погрешность измерений скорости сварки с помощью цифровых УКСС в случае МДТС-05М1 не превышает $\pm 2,0\%$, а в случае ТСДС-06М $\pm 2,5\%$.

Следует подчеркнуть, что резистометрический способ определения линейной координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки, а также цифровые УКСС для его реализации успешно использованы в разработанных в ИЭС совместно с НИЦ СКАЭ [14–17] современных аппаратно-программных тренажерных комплексах (сварочных тренажерах) МДТС-05М1, ТСДС-06М и ТСДС-06М1, широко представленных и находящихся в эксплуатации в Украине и в ряде стран ближнего и дальнего зарубежья (например, в Казахстане, Беларуси, РФ, Македонии, Китае

и в др. странах). Только в России в эксплуатации находятся более 1200 таких аппаратно-программных тренажерных комплексов, при этом в ряде их образовательных заведений, учебных и аттестационных центров, на базе этих тренажеров созданы целые тренажерные классы и лаборатории для подготовки сварщиков РДС, ТИГ- и МИГ/МАГ-сварки. Опыт применения этих технических средств обучения подтверждает их высокую эксплуатационную надежность, экономичность и эффективность как для профессионального отбора и начальной профессиональной подготовки сварщиков, так и для повышения квалификации сварочного персонала, производственного тренажа и тестирования, а в ряде случаев и для допускового контроля.

Выводы

1. Резистометрический способ измерения скорости сварки обеспечивает возможность сравнительно простым методом с приемлемой достоверностью определять линейную координату пятна сварочной дуги и скорость его перемещения в дуговых ТСС.

2. Учитывая тенденции развития ТСС наиболее перспективными устройствами, обеспечивающими реализацию резистометрического способа определения линейной координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки, являются цифровые УКСС.

3. В некоторых случаях резистометрический способ измерения скорости сварки может быть применим и для решения задач мониторинга реальных процессов дуговой сварки.

В заключение авторы считают необходимым выразить признательность инженерам Скопюку М. И., Гавве В. М., Череднику А. Д., Попову В. Е., Мужиченко А. Ф., Мухе А. А. и Олияненко Д. С. за ценную помощь, которую они оказали при подготовке настоящей работы.

Список литературы

1. Даниляк С. Н. (1990) Вопросы построения измерительных преобразователей контроля теплосодержания сварочной ванны и скорости сварки для сварочных тренажеров. *Моделирование в тренажерных системах*. Киев, Наукова Думка, сс. 111–118.
2. Бигдаш В. Д. (1990) Устройства контроля скорости сварки в тренажерных сварочных системах. *Там же*, сс. 143–150.
3. Васильев В. В., Симак Л. А., Богдановский В. А. и др. (2003) *Имитационное моделирование и тренажерно-обучающие системы в электросварке*. Васильев В. В. (ред.), Киев, НАН Украины.
4. Бут С. Н., Чернов А. В., Кривин В. В. (2003) Система отслеживания движения в тренажере оператора ручной дуговой сварки. *Известия вузов. Электромеханика*, 3, 74–75.
5. Rose J. L. et al. (1984) *Closed loop control of welding process using ultrasonic measurement*. GB, Pat. 2130369, IC G01S 15/16; B 23K9/12.
6. Мияда Содзабури и др. (1983) *Автоматическое измерение скорости сварки детектированием дуги*. Япония, Заявка 58-107273, МКИЗ В 23K9/10.

7. Васильев В. В., Даниляк С. Н., Ильчишин А. П. и др. (1988) *Тренажер для обучения навыкам ведения сварки*. СССР, А. с. 1388935, МКИЗ G09 В 19/24.
8. Васильев В. В., Даниляк С. Н., Ткаченко В. В. и др. (1991) *Тренажер сварщика*. СССР, А. с. 1663619, МКИЗ G09 В 19/24.
9. Патон Б. Е., Васильев В. В., Богдановский В. А. и др. (1987) *Тренажер сварщика*. СССР, А. с. 1302313, МКИЗ G09 В 19/24.
10. Васильев В. В., Даниляк С. Н. и др. (1992) *Устройство для контроля скорости сварки и теплосодержания сварочной ванны*. СССР, А. с. 1773622, МКИЗ В 23K 9/10.
11. Ланкин Ю. Н. (2001) Акустическая эмиссия сварочной дуги. *Автоматическая сварка*, 2, 25–31.
12. Васильев В. В., Грездов Г. И., Симак Л. А. и др. (2002) *Моделирование динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов*. Васильев В. В. (ред.), Киев, НАН Украины.
13. Симак Л. А. (1984) Метод автоматического определения координат зонда в проводящей среде на основе дифференциальных преобразований. *Электронное моделирование*, 6, 90–91.
14. Патон Б. Е., Коротинский О. Е., Богдановский В. О. та ін. (2009) *Спосіб оцінювання параметрів руху зварювальної дуги в дугових тренажерних системах*. Україна, Пат. № 86609.
15. Лобанов Л. М., Богдановський В. О., Коротинський О. С. та ін. (2009) *Дуговий тренажер зварника*. Україна, Пат. № 87395.
16. Лобанов Л. М., Богдановский В. А., Коротинский А. Е. и др. (2009) *Тренажер для обучения сварщика ручной дуговой сварке плавящимся и неплавящимся электродом*. РФ, Пат. № 2373040.
17. Патон Б. Е., Коротинский А. Е., Богдановский В. А. и др. (2010) *Способ определения параметров движения сварочной дуги при тренаже или тестировании сварщика на дуговых тренажерных системах*. РФ, Пат. № 2396158 С2.

References

1. Danilyak, S.N. (1990) *Problems of construction of measuring transducers for control of welding pool heat content and welding speed for welding simulators: Simulation in training system*. Kiev, Naukova Dumka, pp. 111–118 [in Russian].
2. Bigdash, V.D. (1990) Device for welding speed control in training welding systems. *Ibid.*, pp. 143–150 [in Russian].
3. Vasiliev, V.V., Simak, L.A., Bogdanovsky, V.A. et al. (2003) *Simulation and training systems in electric welding*. Ed. by V.V. Vasiliev. Kiev, NANU [in Russian].
4. But, S.N., Chernov, A.V., Krivin, V.V. (2003) System of movement tracking in simulator of manual arc welding operator. *Uzv. Vuzov. Elektromekhanika*, 3, 74–75 [in Russian].
5. Rose, J.L. et al. (1984) *Closed loop control of welding process using ultrasonic measurement*. Pat. 2130369 GB, Int. Cl. G01S 15/16; B 23K99/12.
6. Miyada Sodaburi et al. (1983) *Automatic measurement of welding speed by arc detection*. Pat. application 58-107273 Japan, Int. Cl. B 23K9/70.
7. Vasiliev, V.V., Danilyak, S.N., Ilchishin, A.P. et al. (1988) *Simulator for training the welding habits*. USSR author's cert. 1388935, Int. Cl. G09 B 19/24 [in Russian].
8. Vasiliev, V.V., Danilyak, S.N., Tkachenko, V.V. et al. (1991) *Simulator of welding*. USSR author's cert., Int. Cl. G09 B 19/24 [in Russian].
9. Paton, B.E., Vasiliev, V.V., Bogdanovsky, V.A. et al. (1987) *Simulator of welder*. USSR author's cert. 1302313, Int. Cl. G09 B 19/24 [in Russian].
10. Vasiliev, V. V., Danilyak, S. N. et al. (1992) *Device for control of welding speed and heat content of welding pool*. USSR author's cert. 1773622, Int. Cl. B 23K 9/10 [in Russian].
11. Lankin, Yu.N. (2001) Acoustic emission of the welding arc (Review). *The Paton Welding J.*, 2, 25–32.
12. Vasiliev, V.V., Grezdov, G.I., Simak, L.A. et al. (2002) *Modeling of dynamic systems: Aspects of monitoring and*

- signal processing. V.V. Vasiliev (Ed.), Kiev, NASU [in Russian].
13. Simak, L.A. (1984) Method of automatic determination of probe coordinates in conducting medium based on differential transformations. *Elektronnoe Modelirovanie*, 6, 90-91 [in Russian].
 14. Paton, B.E., Korotynsky, O.E., Bogdanovsky, V.O. et al. (2009) *Method of evaluation of parameters of welding arc movement in arc training systems*. Pat. 86609 Ukraine [in Ukrainian].
 15. Lobanov, L.M., Bogdanovsky, V.O., Korotynsky, O.E. et al. (2009) *Arc simulator of welder*. Pat. 87395 Ukraine [in Ukrainian].
 16. Lobanov, L.M., Bogdanovsky, V.A., Korotynsky, A.E. et al. (2009) *Simulator for training of welder of arc consumable and non-consumable electrode welding*. Pat. 2373040 RF [in Russian].
 17. Paton, B.E., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2010) *Method of determination of parameters of welding arc movement in training and testing of welder on arc training systems*. Pat. 2396158 C2 RF [in Russian].

Л. М. Лобанов¹, Н. М. Махлін², О. Є. Коротинський¹,
В. Ю. Буряк², О. Г. Сіпаренко²

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

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

РЕЗИСТОМЕТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розглянуто деякі теоретичні питання резистометричного способу визначення координат плями зварювальної дуги і оцінювання швидкості переміщення електрода при здійсненні або імітації дугового зварювання, а також особливості побудови апаратної частини і програмного забезпечення тренажерних зварювальних систем з використанням цього способу. Наведені приклади використання цього методу в розроблених і промислово виготовлених в ДП «Науково-інженерний центр зварювання та контролю в галузі атомної енергетики України Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України»

(НІЦ ЗКАЕ) апаратно-програмних комплексах (зварювальних тренажерах), а також основні варіанти схемотехнічного побудування пристроїв для реалізації в тренажерних зварювальних системах резистометричного способу. Бібліогр. 17, рис. 4.

Ключові слова: координати плями дуги, швидкість зварювання, тренажерні зварювальні системи, імітатор зварювального виробу, пристрої контролю швидкості зварювання, датчики зварювального струму, «струмова петля»

L.M. Lobanov¹, N.M. Makhlin², A.E. Korotynsky¹,
V.Yu. Buryak², A.G. Siparenko²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua
²SE «Scientific and engineering center of welding
and control in the field of nuclear energy of Ukraine
of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: electro@paton.kiev.ua

RESISTOMETRIC METHOD OF MEASURING WELDING SPEED FOR ARC WELDING SIMULATION SYSTEMS

Some theoretical problems of resistometric method for determination of welding arc spot coordinates and evaluation of speed of electrode movement during realization or simulation of arc welding, as well as the peculiarity of creating hardware part and software of simulating welding systems are considered using this method. The examples of using this method in the hardware-software complexes (welding simulators), as well as the basic variants of circuit design of devices for realization of resistometric method in the simulating welding systems, designed and industrially manufactured at the SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, are presented. 17 Ref., 4 Fig.

Key words: arc spot coordinates, welding speed, simulating welding systems, simulator of welded workpiece, welding speed control devices, welding current sensors, «current loop»

Поступила в редакцию 13.11.2017

НОВАЯ КНИГА

Лучевые технологии в сварке и обработке материалов: Сб. докл. Восьмой межд. конф. / Под ред. проф. И. В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. — 128 с. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/twmp2017.pdf>).

В сборнике представлено 23 доклада Восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» (11–15 сентября 2017 г., Одесса, Украина), в которых отражены достижения за последние годы в области электронно-лучевых и лазерных технологий при сварке, наплавке, обработке материалов и в специальной электрометаллургии. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из Украины, Беларуси, Канады, Китая, Ирана и Польши. Для научных и инженернотехнических работников.



РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ ПАЙКИ

М. В. КУЛИНИЧ¹, В. Н. БЕЗПАЛЬЧУК², С. Г. КОСИНЦЕВ¹, А. М. ГУСАК²,
Т. В. ЗАПОРОЖЕЦ², А. И. УСТИНОВ¹

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

²Черкасский национальный университет им. Богдана Хмельницкого. 18031, г. Черкассы, бульв. Шевченко, 81.

В работе теоретическими и экспериментальными методами исследованы температурные поля в условиях пайки металлических пластин, контактирующих с разогретым телом. Для определения тепловых условий, необходимых для обеспечения пайки (расплавления припоя в зоне соединения), был проведен расчет распределения температуры во времени в зоне соединения в зависимости от характеристик системы «нагреватель–пластина–припой–пластина» и теплового сопротивления в контактах между элементами системы. Показано, что путем сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных термограмм можно определить тепловое сопротивление в зонах контакта. На основе полученных значений теплового сопротивления в контактах проведено моделирование тепловых полей в системах с произвольными размерами элементов. Библиогр. 13, рис. 7.

Ключевые слова: тепловые поля, нестационарный процесс, метод конечных разностей, реакционная пайка, неразъемное соединение, многослойная фольга, локальный разогрев

Пайка широко используется для получения неразъемных соединений деталей [1, 2]. Этот процесс проводится путем нагревания соединяемых деталей в печи до температуры плавления припоя (стационарные условия) или локального разогрева зоны соединения с помощью, например, контакта с разогретым ранее телом или при воздействии на нее источника концентрированного теплового излучения (инфракрасного [3], лазерного [4] и др.) [5]. В условиях локального разогрева зоны соединения до температуры плавления припоя распределение температурных полей в зоне соединения будет носить нестационарный характер, поскольку разогрев будет сопровождаться отводом тепла на холодные участки соединяемых деталей. При отсутствии ограничений мощности концентрированных источников тепла реализация этого процесса пайки не будет вызывать трудностей даже в условиях проведения ремонтных работ на поверхности деталей большого размера, например, при наложении заплат на оболочку из материала с высокой теплопроводностью (алюминиевые сплавы).

В отсутствии концентрированных источников тепловой энергии и большой площади соединения для его разогрева могут быть использованы нагреватели, в которых генерирование тепловой энергии происходит в результате инициирования в них экзотермической реакции. В качестве таких нагревателей могут быть использованы порошковые смеси, компоненты которых реагируют с выделением тепла. Известно, что интенсивность про-

текания экзотермических реакций существенно возрастает при переходе от порошковых смесей к компактным материалам с композиционной структурой на их основе. Так, в работах [6, 7] было показано, что в качестве таких композиционных материалов могут быть использованы многослойные фольги, состоящие из слоев на основе интерметаллидообразующих элементов, таких, например, как Ni и Al или Ti и Al, полученные вакуумным послойным осаждением [8]. При инициировании в таких системах реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) интенсивность тепловыделения достигает величины порядка 5...6 кВт/см² [9], что может обеспечить локальный разогрев зоны соединения в условиях интенсивного теплоотвода.

Схематически такой процесс пайки пластин одинакового размера можно представить, как показано на рис. 1 (лабораторная система). Для такой системы характеристики нагревателя, необходимые для обеспечения процесса пайки, можно определить экспериментально, изменяя массу реакционного материала. Однако если такой подход к определению характеристик нагревателя применим для пластин одинакового размера, то в случае, например, присоединения пластины малого (конечного) размера к пластине большого (неограниченного) размера будет вызывать затруднение. Главным образом это связано с необходимостью учета отвода тепла от зоны соединения в пластину большого размера при использовании результатов,

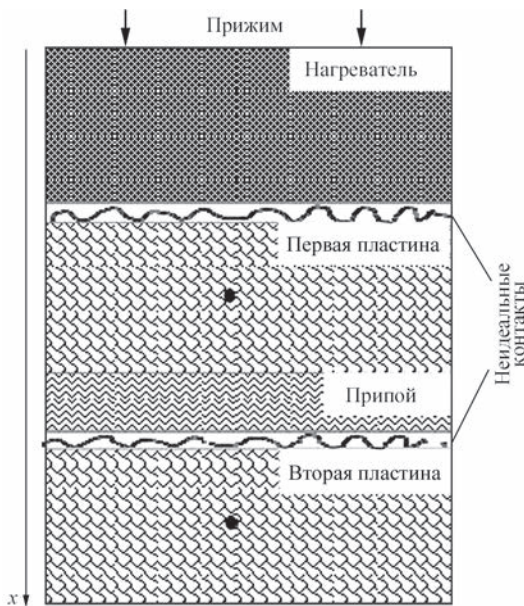


Рис. 1. Схема получения неразъемного соединения пластин одинакового размера (лабораторная система) методом пайки с помощью локального разогрева зоны соединения от внешнего нагревателя

полученных на образцах конечного размера. Ясно, что для компенсации этого отвода тепла параметры нагревателя необходимо увеличить. Однако, учитывая, что пластины изготовлены из алюминиевых сплавов, увеличение массы нагревателя может привести к их значительному перегреву. Вследствие этого механические свойства пластин будут деградировать. С этой точки зрения выбор характеристик нагревателя является ключевым при изменении размеров соединяемых элементов системы. Определение оптимальных характеристик нагревателя, необходимых для обеспечения реакционной пайки пластин произвольного размера в условиях локального разогрева зоны соединения, можно было бы выполнить на основе расчета тепловых полей.

Вместе с тем сложность реализации этого подхода обусловлена тем, что тепловые процессы в зоне соединения зависят от многих параметров, одни из которых известны (например, теплопроводность соединяемых материалов) или представляют собой геометрические и массовые характеристики элементов системы, другие же имеют неопределенное значение, как, например, вели-

чина теплового сопротивления на границе контакта элементов системы. Для устранения этой неоднозначности в выборе параметров для моделирования тепловых полей в реальных системах в работе предложен метод расчета коэффициентов теплового сопротивления контактов, основанный на проведении сравнения экспериментально измеренного и рассчитанного изменения температуры в системе конечного размера (лабораторная система). Путем варьирования параметров, характеризующих тепловое сопротивление на границах раздела элементов, получено удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных, что позволяет провести моделирование тепловых полей в нестационарных условиях пайки пластины ограниченного размера на поверхности детали неограниченного размера.

Экспериментальные и расчетные методы.

Для описания нестационарного процесса распространения тепла в трехмерном образце запишем уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad} T), \quad (1)$$

где c — теплоемкость материала; ρ — плотность; κ — коэффициент теплопроводности.

Учитывая, что система состоит из различных материалов, которые имеют различный характер теплового обмена между отдельными областями, удобно разбить ее на конечные элементы. В работе для решения этого уравнения использован метод конечных разностей [10, 11], который позволяет определять значение температуры в конечном элементе через значения температур в соседних и характеристики теплопроводности материала:

$$T_{i,j,k}^{\text{new}} = T_{i,j,k} + a_k^2 \left(\frac{T_{i-1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i+1,j,k}}{dx^2} + \frac{T_{i,j-1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j+1,k}}{dy^2} + \frac{T_{i,j,k-1} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j,k+1}}{dz^2} \right) dt, \quad (2)$$

где $a_k^2 = k / (c\rho)$ — коэффициент температуропроводности; $T_{i,j,k}$ — температура конечного элемента в точке $x_{i,j,k}$.

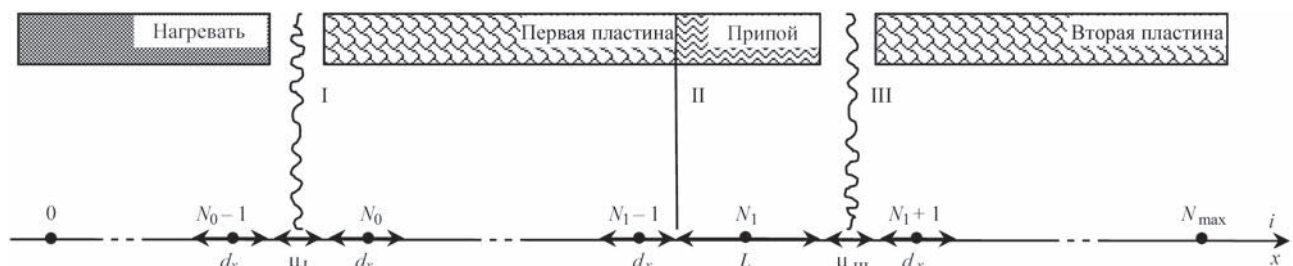


Рис. 2. Схема разбиения системы, состоящей из нагревателя, первой пластины, припоя и второй пластины, на ячейки конечного размера (схема соответствует одномерному приближению)

Данная конечно-разностная схема (2) может быть применена для всех непограничных областей системы. У граничных элементов соседние точки будут характеризоваться существенно отличными теплопроводностями или же геометрическими/массовыми параметрами. Поэтому для пограничных областей более удобно записывать плотность теплового потока в виде разности температур вместо температурных градиентов, используя при этом некоторый «коэффициент переноса тепла» μ вместо теплопроводности κ . Например, $J = -\mu_{i,i+1} \Delta T$ для ячеек i и $(i + 1)$ с коэффициентами теплопроводности κ_i, κ_{i+1} и размерами ячеек h_i, h_{i+1} .

$$\mu_{i,i+1} = \frac{2\kappa_i \kappa_{i+1}}{\kappa_i h_{i+1} + \kappa_{i+1} h_i}. \quad (3)$$

Тогда для ячеек, у которых есть соседние ячейки с иными коэффициентами теплопроводности или размерами, уравнение (2) изменяется. В одномерном случае оно записывается в виде

$$T_i^{new} = T_i + \frac{1}{c_i \rho_i h_i} (-\mu_{i-1,i} (T_i - T_{i-1}) + \mu_{i,i+1} (T_{i+1} - T_i)) dt. \quad (4)$$

На рис. 2 показаны три контактные зоны, для которых применяется уравнение (4):

I — между нагревателем и первой пластиной (неидеальный контакт);

II — между первой пластиной и припоем (идеальный контакт, образованный путем осаждения припоя в вакууме);

III — между припоем и второй пластиной (неидеальный контакт).

Напомним, что неидеальность контакта I означает рост теплового сопротивления и снижение теплового потока между нагревателем (ячейка $N_0 - 1$) и первой пластиной (N_0). Контакт I описываем коэффициентом теплопереноса μ , который в общем случае является неопределенной величиной. Неидеальность контакта III подразумевает тепловое сопротивление между припоем (ячейка N_1) и второй пластиной ($N_1 + 1$) (рис. 2) и описывается коэффициентом теплопереноса μ_{III} , который также является неопределенным параметром системы. Поскольку, как упоминалось, контакт II является идеальным, для него коэффициент теплопереноса определяется исходя из уравнения (3):

$$\mu_{N_1-1,N_1} = 2\kappa_{plate1} \kappa_{solder} / (\kappa_{plate1} L + \kappa_{solder} dx).$$

Изменение температуры слева и справа от контакта I описывается уравнениями:

$$T_{N_0-1,j,k}^{new} = T_{N_0-1,j,k} + \left(-\frac{a_{heater}^2}{dx^2} (T_{N_0-1,j,k} - T_{N_0-2,j,k}) + \frac{\mu_1 a_{heater}^2}{\kappa_{heater}} dx (T_{N_0,j,k} - T_{N_0,-1,j,k}) \right) dt,$$

$$T_{N_0,j,k}^{new} = T_{N_0,j,k} + \left(-\frac{\mu_1 a_{plate1}^2}{\kappa_{plate1}} dx (T_{N_0,j,k} - T_{N_0-1,j,k}) + \frac{a_{plate1}^2}{dx^2} (T_{N_0+1,j,k} - T_{N_0,j,k}) \right) dt. \quad (5)$$

Контакты II и III относятся к припою, который пребывает в твердом состоянии при низких температурах $T < T_{out}$, жидком при $T > T_{out}$ и сохраняет постоянную температуру T_{out} при возрастающей доле жидкой фазы η в процессе плавления. Поэтому удобно ввести временные переменные T_{XL}, T_{XR} для левой и правой границы припоя. Используя условие непрерывности тепловых потоков на этих границах, можно найти, что:

$$T_{XL} = \frac{(\kappa_{solder} dx T_{N_1,j,k} + L \kappa_{plate1} T_{N_1-1,j,k})}{L \kappa_{plate1} + \kappa_{solder} dx}, \quad (6)$$

$$T_{XR} = \frac{(L \mu_{III} T_{N_1+1,j,k} + 2 \kappa_{solder} T_{N_1,j,k})}{2 \kappa_{solder} + L \mu_{III}}.$$

Тогда тепловые потоки к припою и из него:

$$J_{in} = -2 \kappa_{plate1} \kappa_{solder} \frac{(T_{N_1,j,k} - T_{N_1-1,j,k})}{L \kappa_{plate1} + \kappa_{solder} dx}, \quad (7)$$

$$J_{out} = -\frac{\mu_{III} \frac{2 \kappa_{solder}}{L}}{\mu_{III} + \frac{2 \kappa_{solder}}{L}} (T_{N_1+1,j,k} - T_{N_1,j,k}),$$

где J_{in}, J_{out} — входящий и исходящий тепловые потоки для ячейки припоя (его мы описываем лишь одной ячейкой, которая при низких температурах соответствует твердому состоянию, при высоких — жидкому, а в промежуточный период — двухфазной системе твердое тело–жидкость с температурой эвтектики).

Когда температура припоя ниже температуры эвтектики (твердый припой) или выше (жидкий), она определяется по уравнению

$$T_{N_1,j,k}^{new} = T_{N_1,j,k} + (J_{in} - J_{out}) dt / c_{solder} \rho_{solder} dx. \quad (8)$$

Тогда поток тепла в припой, так и из него будет описываться следующим образом:

$$\eta^{new} = \eta + (J_{in} - J_{out}) dt / \lambda L \rho_{solder}, \quad (9)$$

где L, λ, ρ — толщина слоя припоя, удельная теплота плавления и плотность, соответственно.

Коэффициент теплопроводности припоя κ_{solder} изменяется как $\kappa_{solder} = \kappa_{solder}^{liquid} \eta + \kappa_{solder}^{solid} (1 - \eta)$, в соответствии с изменением содержания жидкой и твердой фазы. Более того, мы предполагаем, что после полного плавления припоя тепловое сопротивление между ним и второй пластиной значительно уменьшается (т. е. коэффициент теплопереноса μ_{III}^{new} возрастает), поскольку возрастает

площадь поверхности соприкосновения жидкого припоя с поверхностью второй пластины. Учитывая это, изменение коэффициента μ_{III} после начала плавления припоя можно представить в виде

$$\mu_{III}^{new} = \kappa_{plate2} \left(\mu_{solid} (1 - \eta) + \eta \frac{2\kappa_{solder}^{liquid}}{L} \right) / \left(\kappa_{plate2} + \frac{\eta \kappa_{solder}^{liquid}}{L} dx \right), \quad (10)$$

где μ_{solid} — коэффициент теплопереноса между твердой фазой припоя и второй пластиной. В предельном случае $\eta = 0$ уравнение (10) сводится к $\mu_{III}^{new} = \mu_{solid}$. В другом предельном случае оно упрощается в

$$\mu_{III}^{new} = \frac{2\kappa_{plate2} \kappa_{solder}^{liquid}}{L\kappa_{plate2} + \kappa_{solder}^{liquid} dx},$$

т. е. совпадает с общим уравнением (3). Как следствие, уравнение (3) может быть написано для конечных пограничных ячеек системы, если принимать во внимание, что существование неидеальных контактов между разными элементами ведет к появлению теплового сопротивления, а при некоторой температуре происходит плавление припоя. Более подробно этот подход описан в работе [12]. Его использование позволяет рассчитывать температурное распределение в каждый момент времени в зависимости от параметров системы и проследить таким образом изменение температуры в заданной точке системы.

Для проверки этого подхода к описанию тепловых полей при нестационарном режиме пайки необходимо сравнить рассчитанные значения температуры с экспериментально измеренными. С этой целью исследована система, состоящая из нагревателя и двух пластин из сплава АМг6 толщиной 5 мм и размером 50×50 мм, разделенных слоем (100 мкм) припоя (эвтектический сплав Al-Si), осажденного на первую пластину. В ка-

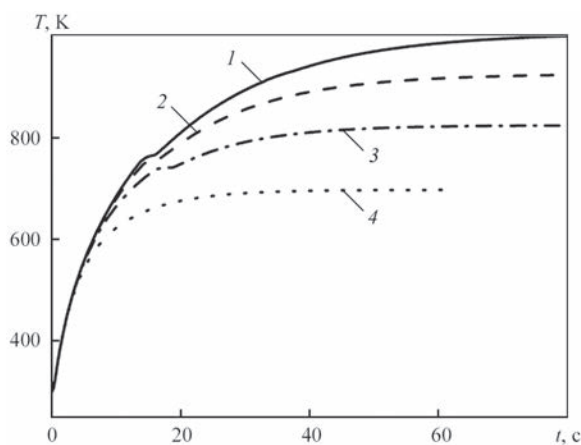


Рис. 3. Влияние толщины нагревателя на кинетику изменения температуры в центре первой пластины: 1 — $d_n = 5$ мм; 2 — 4; 3 — 3; 4 — 2

честве нагревателя использовали многослойную фольгу Al/Ni, которую размещали над первой пластиной и прижимали ее с заданным усилием (порядка 1000 Н). Затем с помощью импульса тока в нанополоске инициировали СВС реакцию, сопровождающуюся интенсивным выделением тепла. В результате перераспределения тепла от нагревателя к пластинам система разогревалась до заданной температуры. Для измерения температуры использовали две тонкие термопары, заведенные в центры пластин (рис. 1). Термопары были подключены к компьютеру через АЦП с частотой опроса 1 кГц. Полученные данные использовали для определения параметров модели.

Результаты и обсуждение. Для определения условий плавления припоя были выполнены расчеты тепловых полей системы, основываясь на характеристиках использованных материалов и их толщинах, при вариации толщины нагревателя d_n . На рис. 3. представлены расчетные изменения температуры в первой пластине, полученные с учетом предположения, что скорость СВС реакции в нагревателе существенно больше скорости распространения тепла. Это предположение основывается на том, что при скорости распространения фронта СВС реакции 100 см/с время «сгорания» фольги толщиной 5 см составит 0,05 с [13]. В этом случае при описании характеристики нагревателя исходили из его геометрических размеров и температуры, которой он достигает в результате СВС реакции. Временем его разогрева до максимальной температуры пренебрегали. Видно, что с увеличением толщины нагревателя максимальная температура разогрева первой пластины, да и всей системы в целом (расчеты проводились в адиабатических условиях), возраста-

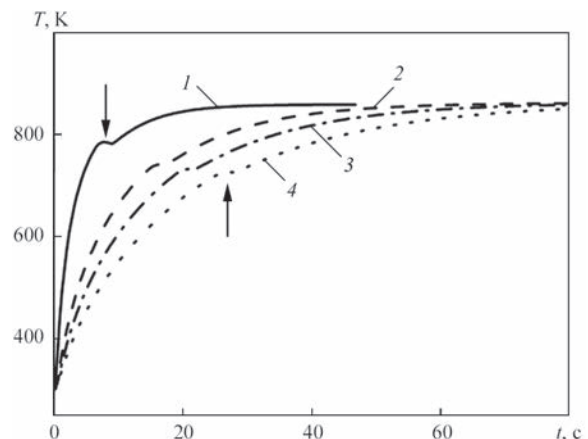


Рис. 4. Зависимость температуры первой пластины от времени при различных характеристиках теплового сопротивления на границе раздела нагреватель — первая пластина: 1 — $\mu_0 = 5 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К); 2 — $1 \cdot 10^4$; 3 — $7 \cdot 10^3$; 4 — $5 \cdot 10^3$. Характеристики теплопроводности контакта припоя и второй пластины постоянны (стрелками указаны особенности изменения температуры, обусловленные плавлением припоя (его окончанием))

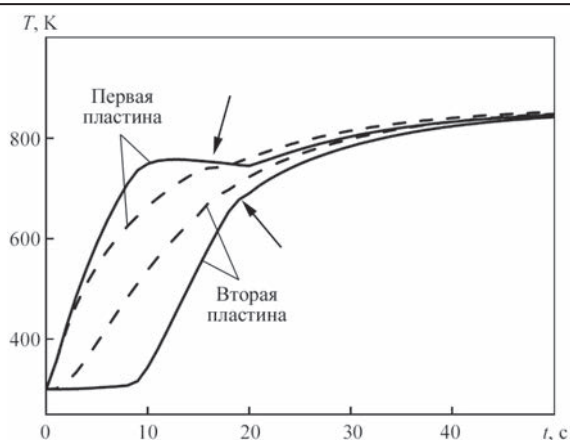


Рис. 5. Зависимость температуры в середине пластин от времени при различных характеристиках теплового сопротивления на границе раздела припой — вторая пластина: $\mu_1 = 5 \cdot 10^2$ (сплошная линия); $5 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К) (штриховая). Характеристики теплопроводности контакта нагревателя и первой пластины постоянны (обозначение стрелок то же, что и на рис. 4)

ет. Если температура плавления припоя задана, то путем увеличения толщины нагревателя d_n систему можно разогреть до необходимого уровня. Например, нагреватель толщиной 3 мм обеспечивает расплавление припоя с температурой плавления 700 К (рис. 3), что влияет на зависимость температуры в центре первой пластины от времени контакта с нагревателем (расчетные данные) в виде «полочки». Отметим, что температура «полочки» несколько выше, чем температура плавления припоя, причем эта разность возрастает при увеличении толщины нагревателя (его теплотворной способности) как следствие температурного градиента, присутствующего в первой пластине, который увеличивается пропорционально скорости нагревания.

Можно предположить, что скорость нагрева первой пластины будет в значительной степени зависеть от теплового сопротивления контак-

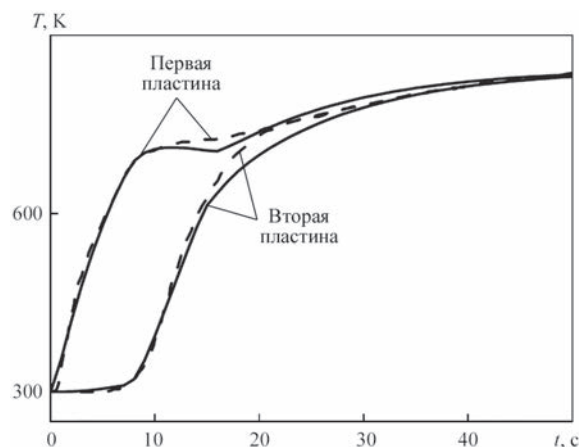


Рис. 6. Экспериментально измеренное (штриховая линия) и расчетная (сплошная) температура в середине первой и второй пластин в процессе пайки при локальном их разогреве с помощью нагревателя, контактирующего с первой пластиной

та между нагревателем и первой пластиной. На рис. 4 представлены рассчитанные данные при одинаковой толщине нагревателя (3 мм), но с различной величиной теплового сопротивления в контакте между нагревателем и первой пластиной. Видно, что при изменении величины теплового сопротивления скорость нагрева существенно изменяется, что отображается на времени плавления припоя: при увеличении теплового сопротивления на порядок время до полного расплавления припоя увеличивается с 5 до 30 с.

Поскольку температура припоя и степень его расплавления являются результатом теплового баланса между тепловым потоком из нагревателя в первую пластину и тепловым потоком из припоя во вторую пластину, можно предположить, что тепловое сопротивление на границе раздела между припоем и второй пластиной будет также оказывать влияние на изменения температуры припоя. Действительно, как видно из рис. 5, увеличение теплопроводности в зоне контакта между припоем и второй пластиной приводит к замедлению нагрева первой пластины, а, следовательно, и припоя. Однако, несмотря на то, что при уменьшении теплопроводности на границе между припоем и второй пластиной плавление припоя начинается раньше, время до его завершения увеличивается. Из зависимости температуры от времени в середине второй пластины (рис. 5) видно, что плавление припоя завершается, когда ее температура достигает температуры плавления припоя.

Если исходить из того, что процесс пайки происходит при условии полного расплавления припоя, результаты расчетов указывают на то, что величина теплопроводности контакта между припоем и второй пластиной не оказывает существенного влияния на время завершения этого процесса.

На рис. 6 представлены расчетные и экспериментальные данные в описанной выше системе, измеренные с помощью термопар, закрепленных в середине первой и второй пластин. Видно, что температура первой пластины, контактирующей с нагревателем, резко увеличивается с момента начала СВС реакции в нагревателе. Однако через 8...9 с скорость нагрева первой пластины резко меняется. За это время температура первой пластины и прикрепленного к ней припоя достигает температуры плавления припоя (порядка 700 К). На этом основании можно предположить, что замедление роста температуры в первой пластине обусловлено плавлением припоя.

В пользу этого свидетельствует и точка начала увеличения температуры во второй пластине. Такая задержка во времени разогрева второй пластины может быть объяснена большим тепловым сопротивлением в контакте между припоем и вто-



Рис. 7. Распределение температуры в поперечном сечении системы (показано 1/4 ее часть) при ее локальном разогреве в момент плавления припоя. Длина и ширина второй пластины в 3 раза превышают длину и ширину первой пластины

рой пластиной. После плавления припоя тепловой контакт между ним и второй пластиной улучшается, что и способствует перераспределению тепла от припоя ко второй пластине и ее разогреву до уровня температуры первой пластины.

Путем варьирования параметров теплового сопротивления в контактах было рассчитано изменение температуры в системе в процессе ее разогрева, качественно подобное наблюдаемому экспериментально (рис. 6). При этом предполагалось, что в момент расплавления припоя тепловое сопротивление на границе раздела между припоем и второй пластиной исчезает.

На этом основании мы предположили, что рассчитанные параметры теплового сопротивления в контактах при данных условиях проведения процесса пайки можно использовать для расчета температурных полей в случае, когда первая пластина присоединяется ко второй пластине, размеры которой значительно больше, т. е. на трехмерный случай.

На рис. 7 представлено распределение температуры в поперечном сечении системы, состоящей из нагревателя, первой пластины с нанесенным припоем и второй пластины большого размера в момент, когда температура припоя достигает температуры его плавления (необходимое условие для пайки). Видно, что в результате теплообмена между элементами системы тепло распространяется от нагревателя к первой пластине, а затем, через припой, ко второй пластине. В отличие от лабораторной сборки в этом случае тепло распространяется по второй пластине за пределы размеров первой пластины. Однако, как видно из рис. 7, это «растекание» тепла по объему второй пластины не критично с точки зрения достижения температурных условий для пайки в контакте между первой и второй пластинами. Расчеты показали, что для компенсации этих потерь тепла в случае соединения пластин равной толщины достаточно лишь на 10...20 % увеличить толщину нагревателя.

Выводы

1. Расчет тепловых полей при пайке в нестационарных условиях нагрева с помощью локального источника тепла ограниченной энергоемкости показал, что существует принципиальная возможность достичь расплавления припоя, находящегося в виде тонкой прослойки между двумя пластинами с высокой теплопроводностью.

2. Показано, что в адиабатических условиях пайки время, необходимое для расплавления припоя между пластинами, существенно зависит от параметров теплового контакта между нагревателем и первой пластиной, но почти не зависит от параметров теплового контакта между припоем и второй пластиной.

3. На основе экспериментально измеренных термограмм для лабораторной системы, состоящей из элементов с одинаковыми площадями контактов, путем самосогласованного расчета, включающего вариацию параметров, характеризующих тепловое сопротивление в контактах, можно определить их значение.

4. Полученные параметры теплового сопротивления могут быть использованы в моделировании тепловых полей в системах при пайке деталей с произвольными размерами. Показано, что для достижения расплавления припоя при переходе от лабораторной к «реальной» системе с «бесконечной» второй пластиной энергоемкость, а значит и толщину, нагревателя необходимо увеличить на 10...20 %.

Список литературы

1. Merzhanov A. G., Borovinskaya I. P. (1972) Self-propagating high-temperature synthesis of refractory inorganic compounds. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **204**, 366–369.
2. Sytshev A. E., Vadchenko S. G., Boyarchenko O. D. et al. (2013) SHS welding by thermal explosion: Ti–Ti and Ti–NiAl joints. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, **22**(2), 99–102.
3. Ren-Kae Shiue, Chen Chia-Pin, Wu Shyi-Kaan. (2015) Infrared Brazing of Ti50Ni50 Shape Memory Alloy and 316L Stainless Steel with Two Silver-Based Fillers. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **46**(6), 2364–2371.
4. Nothdurft S., Springer A., Kaierle S. et al. (2016) StonisLaser soldering and brazing of steel-aluminum sheets for tailored hybrid tubes. *Journal of Laser Applications*, **28**, 2, <https://doi.org/10.2351/1.4943996>.
5. Jacobson David M., Humpston Giles. (2005) *Principles of Brazing*. USA. Printed in the United States of America.
6. Morsi K. (2001) Review: reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials. *Materials Science and Engineering: A*, **299**, 1–5.
7. Weihs T., Barmak K., Coffey K. (2014) Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications: Structure, Processing and Properties*, **40**, 160–243.
8. Ustinov A. I., Olikhovska L. O., Melnichenko T. V., Shyshkin A. E. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Sur. and Coat. Tech.*, **202**, 3832–3838.
9. Кравчук М. В., Устинов А. И. (2015) Влияние термодинамических и структурных параметров многослойных фольг на характеристики реакции СВС. *Автоматическая сварка*, **8**, 10–15.

10. Фарлоу С. (1985) *Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров*. Пер. с англ. Москва, Мир.
11. Тихонов А. Н., Самарский А. А. (1977) *Уравнения математической физики*. Москва, Наука.
12. Безпальчук В. М., Запорожець Т. В., Кравчук М. В. та ін. (2015) Розрахунок теплових полів у багатофазній тривимірній системі при нестационарних умовах її нагрівання. *Вісник ЧНУ*, 349, **16**, 38–49.
13. Zaporozhets T. V., Gusak A. M., Ustinov A. I. (2010) SHS reactions in nanosized multilayers – analytic model versus numeric model. *Intern. J. of Self Propagating High Temperature Synthesis*, 19(4), 227–236.

References

1. Merzhanov, A.G., Borovinskaya, I.P. (1972) Self-propagating high-temperature synthesis of refractory inorganic compounds. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **204**, 366–369.
2. Sytshev, A.E., Vadchenko, S.G., Boyarchenko, O.D. et al. (2013) SHS welding by thermal explosion: Ti-Ti and Ti-NiAl Joints. *Int. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 22(2), 99–102.
3. Ren-Kae Shiue, Chen Chia-Pin, Wu Shyi-Kaan (2015) Infrared brazing of Ti50Ni50 shape memory alloy and 316L stainless steel with two silver-based fillers. *Metallurg. and Mater. Transact. A*, 46(6), 2364–2371.
4. Nothdurft, S., Springer, A., Kaierle, S. et al. (2016) StonisLaser soldering and brazing of steel-aluminum sheets for tailored hybrid tubes. *J. of Laser Applications*, 28, 2, <https://doi.org/10.2351/1.4943996>.
5. Jacobson, D.M., Humpston, G. (2005) *Principles of brazing. USA*.
6. Morsi, K. (2001) Review: Reaction synthesis processing of Ni-Al intermetallic materials. *Mater. Sci. & Engin.: A*, 299(1–2), 1–5.
7. Weihs, T., Barmak, K., Coffey, K. (2014) Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications: Structure, Processing and Properties*, **40**, 160–243.
8. Ustinov, A.I., Olikhovska, L.O., Melnichenko, T.V., Shyshkin, A.E. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Sur. and Coat. Tech.*, **202**, 3832–3838.
9. Kravchuk, M.V., Ustinov, A.I. (2015) Influence of thermodynamic and structural parameters of multilayer foils on SHS process characteristics. *The Paton Welding J.*, **8**, 8–13.
10. Farlow, S. (1985) *Partial differential equations for scientists and engineers*. Moscow, Mir [in Russian].
11. Tikhonov, A.N., Samarsky, A.A. (1977) *Equations of mathematical physics*. Moscow, Nauka [in Russian].
12. Bezpachuk, V.M., Zaporozhets, T.V., Kravchuk, M.V. et al. (2015) Calculation of thermal fields in multiphase 3D system under nonstationary conditions of its heating. *Visnyk ChNU*, 349(16), 38–49 [in Ukrainian].
13. Zaporozhets, T.V., Gusak, A.M., Ustinov, A.I. (2010) SHS reactions in nanosized multilayers – analytic model versus numeric model. *Intern. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 19(4), 227–236.

М. В. Кулініч¹, В. М. Безпальчук², С. Г. Косінцев¹,
А. М. Гусак², Т. В. Запорожець², А. І. Устінів¹

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

²Черкаський національний університет
ім. Богдана Хмельницького.
м. Черкаси, бульв. Шевченка, 81.

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ ПРОЦЕСІ ПАЯННЯ

В роботі теоретичними та експериментальними методами досліджено температурні поля в умовах паяння металевих пластин, що контактують з розігрітим тілом. Для визначення теплових умов, що необхідні для забезпечення процесу паяння (розплавлення припою в зоні з'єднання), було проведено розрахунок розподілу температури з часом в зоні з'єднання в залежності від характеристик системи «нагрівач–пластина–припій–пластина» і теплового опору в контактах між елементами системи. Показано, що шляхом порівняння теоретично розрахованих і експериментально вимірених термограм можна визначити тепловий опір в зонах контакту. На основі отриманих значень теплового опору в контактах проведено моделювання теплових полів в системах з довільними розмірами елементів. Бібліогр. 13, рис. 7.

Ключові слова: теплові поля, нестационарний процес, метод кінцевих різниць, реакційне паяння, нероз'ємне з'єднання, багатошарова фольга, локальний розігрів

М.В. Kulinich¹, V.N. Bezpachuk², S.G. Kosintsev¹,
A.M. Gusak², T.V. Zaporozhets², A.I. Ustinov¹

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkassy.
81 Shevchenko boulevard, 18031, Cherkassy, Ukraine

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL FIELDS IN THE PROCESS OF NON-STATIONARY BRAZING

In the work theoretical and experimental methods were used to investigate temperature fields in the conditions of brazing the metal plates, contacting with a heated body. To determine thermal conditions, necessary to provide brazing (melting of brazing alloy in the joint zone), calculation of temperature distribution over time in the joint zone was carried out, depending on characteristics of «heater-plate-brazing alloy-plate» system and thermal resistance in contacts between the system elements. It is shown that by comparing the theoretically calculated and experimentally measured thermograms, it is possible to determine thermal resistance in the contact zones. On the basis of the obtained values of thermal resistance in the contacts, the modeling of thermal fields in the systems with the arbitrary sizes of elements was carried out. 13 Ref., 7 Fig.

Keywords: thermal fields, non-stationary process, method of finite differences, reaction brazing, permanent joint, multilayer foil, local heating

Поступила в редакцію 27.11.2017

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ ОТКРЫТЫЙ КОСМОС*

Е. А. АСНИС, Е. Г. ТЕРНОВОЙ, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, А. С. МИЛЕНИН, Г. Ф. РОЗЫНКА
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты расчетных исследований влияния светотеневых границ, способствующих предварительному нагреву освещенных солнцем свариваемых пластин и интенсивному их охлаждению на теневой стороне в процессе электронно-лучевой сварки в условиях, имитирующих открытый космос, на напряженно-деформированное состояние. Для этого разработан комплекс численных методик и программных средств компьютерного моделирования кинетики полей температур, напряжений и деформаций при сварке плавлением встык пластин из алюминиевого сплава АМгб с учетом существенно неоднородного внешнего температурного воздействия. Проведен анализ влияния расположения светотеневых границ относительно сварного шва на формирующееся текущее и остаточное напряженное состояние алюминиевых пластин при сварке. Для этого на основе расчетной кинетики температурного поля, определяемой с учетом особенностей воздействия источника сварочного нагрева и условий внешнего нагрева и охлаждения, методом конечных элементов решались соответствующие задачи нестационарной термопластичности. Проведенные вычисления, в частности, показали, что распределение остаточных напряжений, формирующихся в сварных соединениях пластин из алюминиевого сплава АМгб при различном расположении светотеневых границ, характеризуется максимальными напряжениями, которые не достигают предела текучести основного металла (170...180 МПа). Такие напряжения не должны существенно снижать механические характеристики и работоспособность сварных деталей и узлов, получаемых в условиях открытого космоса. Библиогр. 6, рис. 3.

Ключевые слова: имитация условий открытого космоса, светотеневая граница, напряженное состояние, математическое моделирование

Проведение сварочных работ в условиях открытого космоса, зачастую, может являться необходимой технологической процедурой при монтаже и ремонтно-восстановительных работах ответственных конструктивных элементов космических аппаратов длительного срока эксплуатации. Выбор конкретных параметров сварки, которые гарантируют качество соединения, сопряжен с учетом особенностей влияния факторов космического пространства (низкая гравитация, глубокий вакуум, частая смена светотеневых границ и др.) [1, 2]. Одной из основных особенностей сварки в открытом космосе является резкий перепад температур в теневой и освещенной частях конструкции: на солнечном участке орбиты поверхность элементов космического аппарата может нагреваться до температуры 120 °С, а иногда и выше, тогда как на теневых участках температура снижается до –110 ...–120 °С [1].

Неоднородное внешнее температурное воздействие влияет не только на собственно процесс сварки ввиду различного тепловложения в зависимости от расположения светотеневой границы, но и на формирование металла сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) в условиях различного предварительного подогрева и охлаждения,

а также на особенности термдеформирования конструкции.

Алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами для космического аппаратостроения. При их предварительном подогреве перед сваркой до 100 ... 120 °С увеличиваются размеры сварочной ванны и уменьшается переохлаждение жидкого металла на фронте кристаллизации, что ведет к увеличению размеров кристаллитов и способствует снижению прочности сварного шва [3]. На теневой стороне в результате низких температур может снижаться стойкость металла шва к образованию кристаллизационных трещин, хотя снижение начальной температуры, практически, не оказывает влияние на механические свойства металла шва [4]. Возникающие напряжения в сварных соединениях могут дополнительно влиять на уменьшение стойкости металла шва против горячих трещин и вызывать снижение эксплуатационных характеристик конструкций, что особенно важно при длительных сроках эксплуатации космических аппаратов в космосе.

В связи с весьма ограниченным количеством сварных образцов, полученных в открытом космосе и доставленных на Землю [1], исследования их напряженно-деформированного состояния (НДС) не проводились. Так как экспериментальная оценка влияния условий открытого космоса на НДС сварных соединений сопряжена с объективными

* В работе принимали участие С. А. Глушак, Т. А. Ликаренко.

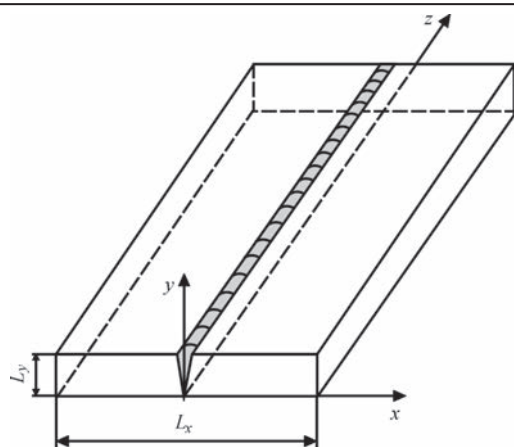


Рис. 1. Схема сварки образца

трудностями, рациональным подходом является использование методов математического и компьютерного моделирования.

Задача настоящего исследования состояла в численном анализе особенностей НДС сварного стыкового соединения, полученного в условиях, имитирующих открытый космос, при различном положении светотеневой границы.

Для решения поставленной задачи был разработан комплекс математических моделей и средств их компьютерной реализации, которые позволяют решать совместные задачи кинетики температурных полей под действием быстро движущегося источника сварочного нагрева и пространственно неоднородного поля температур окружающего пространства. Развитие напряжений и деформаций оценивали в свариваемых встык пластинах (плоское деформированное состояние, рис. 1). Для этого решалась задача нестационарной теплопроводности для поля температур $T(x, y)$ при воздействии источника сварочного нагрева мощностью W :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right) + W = c\gamma(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности; $c\gamma(T)$ — объемная теплоемкость; t — текущий момент времени.

Исходя из особенностей поверхностной теплоотдачи в условиях открытого космоса, граничные условия к уравнению (1) были сформулированы следующим образом:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} = \varepsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_c^4(x)), \quad (2)$$

где

$$T_c(x) = \begin{cases} T_{sh}, & \text{если } x < x_0 \\ T_{sn}, & \text{если } x \geq x_0 \end{cases}, \quad (3)$$

T_{sh}, T_{sn} — температура внешней среды в теневой и солнечной части конструкции, соответственно; ε — степень черноты поверхности свариваемой конструкции; σ_{SB} — константа Стефана–Больцмана; x_0 — текущее положение светотеневой границы; n — нормаль к поверхности.

Прогнозирование остаточных напряжений проводилось с помощью расчетной методики, основанной на последовательном прослеживании развития упругопластических деформаций в точках x, y сечения образцов в процессе сварочного нагрева и последующего остывания [5]. Так, в любой момент времени t тензор деформаций ε_{ij} можно представить в виде суммы тензоров:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^T, \quad (4)$$

где ε_{ij}^e — тензор обратимых упругих деформаций; ε_{ij}^p — тензор неупругих деформаций мгновенной пластичности; ε_{ij}^T — тензор обратимых температурных деформаций.

Таким образом, тензор приращений деформаций $\Delta \varepsilon_{ij}$ на каждом этапе прослеживания представим в следующем виде:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} \left(d\varepsilon_{ij}^T \right), \quad (5)$$

где δ_{ij} — единичный тензор или символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Связь между напряжениями σ_{ij} и приращениями деформаций в точке (x, y) в момент времени t по сравнению с $t = 0$ определяется обобщенным законом Гука с учетом объемных температурных и микроструктурных изменений 3φ и ассоциированным законом пластического течения:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{ij} = & \Psi \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right) + \delta_{ij} \left(K \sigma + \Delta \varepsilon_{ij}^T \right) - \\ & - \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right)^* - (K \sigma)^*, \end{aligned} \quad (6)$$

где Ψ — функция состояния упругопластического материала, определяющая степень развития пластического течения; $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$, $G = E / 2(1 + \nu)$ — модуль сдвига; E — модуль нормальной упругости; ν — коэффициент Пуассона; $K = (1 - 2\nu) / E$ — модуль объемного сжатия.

Функция Ψ отражает состояние материала в точке x, y в момент времени t : она либо равна $1/2G$ (упругое поведение), либо больше $1/2G$ (упругопластическое поведение). Условие текучести позволяет построить итерационный процесс уточнения функции Ψ :

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \quad \text{если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_s(T); \quad (7)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \quad \text{если } \sigma_i = \sigma_s;$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо,

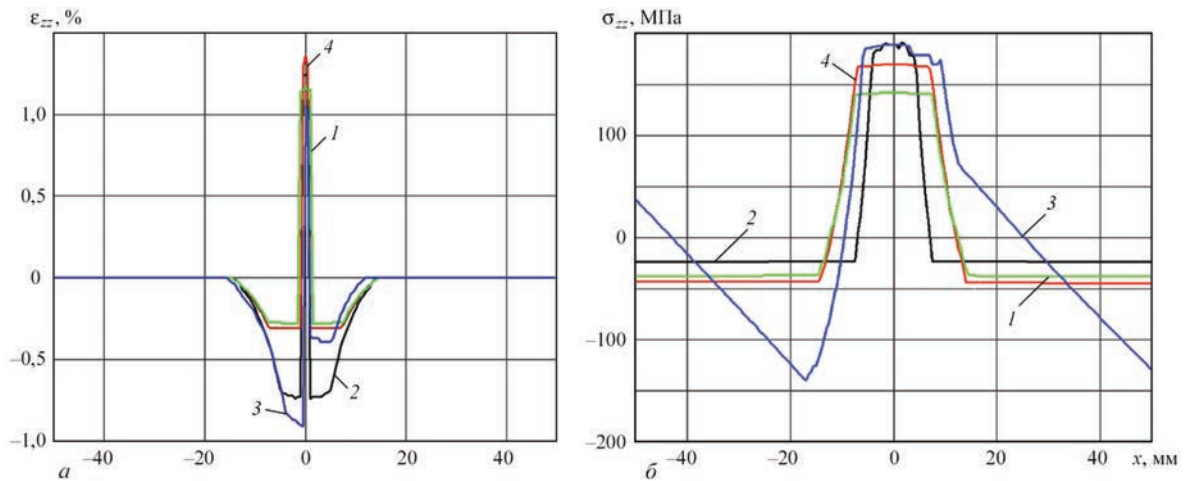


Рис. 2. Распределение остаточных продольных деформаций ε_{zz} (а) и напряжений σ_{zz} (б) по ширине образца при различных условиях внешнего температурного воздействия: 1 — на солнечной; 2 — на теневой стороне; 3 — при расположении светотеневой границы на сварном стыке ($x_0 = 0$), когда одна из свариваемых пластин прогрета до температуры $T_{sn} = 120$ °С (положительная полуось $0x$), другая охлаждена до $T_{sh} = -120$ °С (отрицательная полуось $0x$); 4 — комнатная температура окружающей среды (20 °С)

где σ_T — предел текучести материала; σ_i — интенсивность напряжений.

Без ограничения общности, для проведения вычислений рассматривался характерный плоский сварной образец из алюминиевого сплава АМгб размером $L_z \times L_x \times L_y = 180 \times 50 \times 2$ мм, что соответствует образцам, полученным в космосе. Проводилась электронно-лучевая сварка встык. Режимы сварки: ускоряющее напряжение $U_{уск} = 10$ кВ, ток луча $I_{л} = 100$ мА, скорость сварки $v_{св} = 8$ мм/с. В зависимости от расположения светотеневой границы x_0 относительно линии сварного соединения были рассмотрены следующие условия сварки:

1. Сварка на солнечной стороне ($x_0 < -L_x/2$), т. е. с предварительным подогревом до температуры окружающей среды $T_c = T_{sn} = 120$ °С.
2. Сварка на теневой стороне ($x_0 > L_x/2$), т. е. с охлаждением до температуры окружающей среды $T_c = T_{sh} = -120$ °С.
3. Сварка при расположении светотеневой границы на сварном стыке ($x_0 = 0$), когда одна из

свариваемых пластин прогрета до температуры $T_{sn} = 120$ °С, в то время как другая охлаждена до $T_{sh} = -120$ °С.

Также для сравнения было рассчитано НДС образца указанных выше размеров после сварки при комнатной температуре (20 °С).

Расчеты показали, что поперечные напряжения σ_{xx} и деформации ε_{xx} имеют очень низкие значения, близкие к нулю и, поэтому, в дальнейшем не рассматриваются. Процессы необратимой деформационной усадки в области локального сварочного нагрева определяют формирование высоких продольных деформаций ε_{zz} и напряжений σ_{zz} , что характерно для сварки пластин [6]. Так, величина деформаций ε_{zz} в зависимости от температурных условий на границе свариваемого изделия не превышает 1,5 %, при этом при неравномерном нагреве (условие 3) различия в свойствах свариваемых пластин и условиях нагрева/охлаждения вызывает незначительное увеличение деформаций продольной усадки в теневой части конструкции,

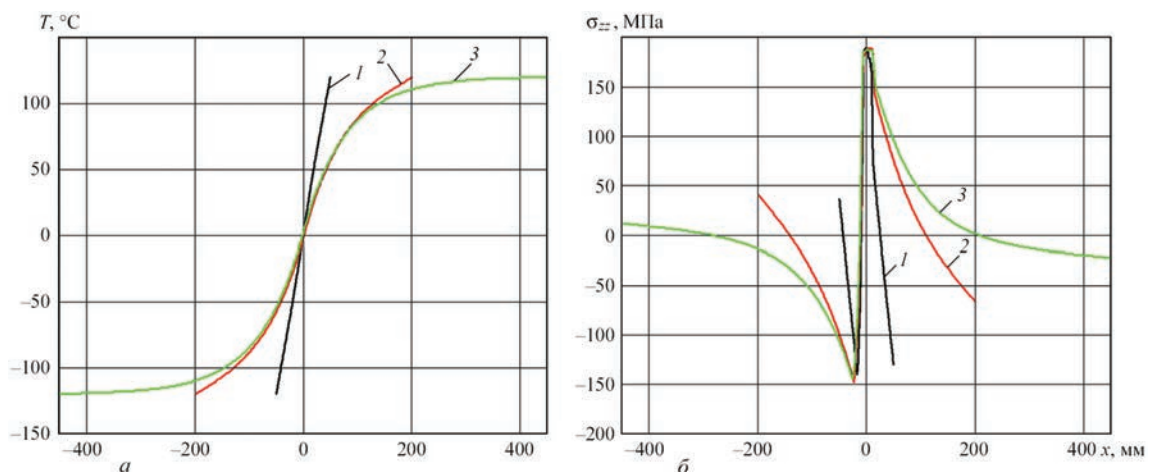


Рис. 3. Влияние ширины свариваемого образца L_x на распределение температур (а) и продольных остаточных напряжений σ_{zz} (б) при условии расположения светотеневой границы вдоль шва: 1 — $L_x = 100$ мм, 2 — 400, 3 — 900

оставляя общие деформации в пределах общепринятых допусков (рис. 2, а).

На рис. 2, б приведены кривые остаточных продольных напряжений σ_{zz} . Наиболее высокие значения наблюдаются в шве и, практически, не отличаются друг от друга в зависимости от температурных условий окружающей среды: отличия определяются разницей предела текучести материала при соответствующих температурах. Характерным отличием поля напряжений при неравномерном нагреве (условие 3) являются ненулевые значения напряжений на периферии образца. Это связано с тем, что несмотря на наличие светотеневой границы на поверхности свариваемого изделия, по толщине металла температура распределяется согласно физическим свойствам металла (теплопроводность и теплоемкость), поэтому переход от температуры $T_{sh} = -120^\circ\text{C}$ к $T_{sn} = 120^\circ\text{C}$ происходит плавно (рис. 3, а). При этом ширина рассматриваемого образца такова, что градиент температур сохраняется по всему его сечению, что приводит к формированию соответствующих уравновешенных напряжений. Увеличение ширины образца нивелирует влияние градиента температур в области светотеневой границы на напряженное состояние изделия на его периферии (рис. 3, б).

Выводы

1. Результаты расчетов показали, что предварительный подогрев и охлаждение не оказывает влияния на НДС сварных соединений алюминиевого сплава АМг6.

2. Напряжения в сварных соединениях не превышают предел текучести основного материала. Такие напряжения не оказывают существенного влияния на прочностные характеристики и работоспособность сварных соединений, полученных в условиях космического пространства.

3. На основе результатов численных исследований продемонстрировано влияние ширины свариваемого встык образца из алюминиевого сплава АМг6 при его неравномерном нагреве в условиях, имитирующих открытый космос, на распределение температур и напряжений. Показано, что наличие светотеневой границы (с диапазоном температур от -120 до 120°C) вызывает формирование переходной области в металле протяженностью около 400 мм. Поэтому при сварке образцов меньшего размера распределение напряжений характеризуется ростом продольной составляющей к периферии изделия.

Список литературы

1. Б. Е. Патон (ред.). (2000) *КОСМОС: технологии, материаловедение, конструкции*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона.
2. Fragomeni J. M., Nunes Jr. A. C. (2003) A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment. *Aerospace Science and Technology*, 7, 373–384.

3. Рабкин Д. М. (1986) *Металлургия сварки алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
4. Бондарев А. А., Терновой Е. Г. (2010) Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автоматическая сварка*, 11, 22–27.
5. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
6. Mi G., Li C., Gao Z. et al. (2014) Finite element analysis of welding residual stresses of aluminum plates under different butt joint parameters. *Engineering Review*, 34, 3, 161–166.

References

1. Paton, B.E. (2000) *Space: technologies, materials science, structures*. Kiev, PWI [in Russian].
2. Fragomeni, J.M., Nunes Jr., A.C. (2003) A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment. *Aerospace Sci. and Technology*, 7, 373–384.
3. Rabkin, D.M. (1986) *Metallurgy of welding of aluminium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Bondarev, A.A., Ternovoj, E.G. (2010) Features of weld formation and properties of aluminium and magnesium alloy joints under simulated space conditions. *The Paton Welding J.*, 11, 16–20.
5. Makhnenko, V.I. (2006) *Resource of safe operation of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Mi, G., Li, C., Gao, Z. et al. (2014) Finite element analysis of welding residual stresses of aluminum plates under different butt joint parameters. *Engineering Review*, 34(3), 161–166.

Ю. А. Аснїс, Є. Г. Терновий, О. А. Великоіваненко,
О. С. Міленін, Г. П. Розинка

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

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ В УМОВАХ, ІМІТУЮЧИХ ВІДКРИТИЙ КОСМОС

Наведено результати розрахункових досліджень впливу світлотіньових границь, які сприяють попередньому нагріву освітлених сонцем пластин, що зварюються, та інтенсивному їх охолодженню на тіньовій стороні в процесі зварювання в умовах, імітуючих відкритий космос, на напружено-деформований стан. Для цього розроблений комплекс чисельних методик і програмних засобів комп'ютерного моделювання кінетики полів температур, напружень і деформацій при зварюванні плавленням встык пластин з алюмінієвого сплаву АМг6 з урахуванням істотно неоднорідного зовнішнього температурного впливу. Проведено аналіз впливу розташування світлотіньових границь відносно зварного шва на поточний і залишковий напружений стан алюмінієвих пластин, що формуються при зварюванні. Для цього на основі розрахункової кінетики температурного поля, яка визначається з урахуванням особливостей впливу джерела зварювального нагріву і умов зовнішнього нагріву та охолодження, методом кінцевих елементів вирішувалися відповідні задачі нестационарної термопластичності. Проведені обчислення, зокрема, показали, що розподіл залишкових напружень, які формуються в зварних з'єднаннях пластин з алюмінієвого сплаву АМг6 при різному розташуванні світлотіньових границь, характеризуються максимальними напруженнями, які не досягають межі текучості основного металу (170...180 МПа). Такі напруги не повинні істотно знижувати механічні характеристики

ки і працездатність зварних деталей і вузлів, отриманих в умовах відкритого космосу. Бібліогр. 6, рис. 3.

Ключові слова: імітація умов космосу, світлотіньова границя, напружений стан, математичне моделювання

E. A. Asnis, E. G. Ternovoj, E. A. Velikoivanenko,
A. S. Milenin, G. F. Rozyuka

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

STRESS-STRAIN STATE OF WELDED JOINTS FROM ALUMINIUM ALLOYS UNDER THE CONDITIONS SIMULATING OPEN SPACE

The paper gives the results of computational research of the influence of light-shade boundaries promoting preheating of joints of sunlit plates to be welded and their intensive cooling on the shaded side during electron beam welding under the conditions simulating open space, on the stress-strain state. A set of numerical

procedures and software for computer modeling of the kinetics of temperature fields, stresses and strains in butt fusion welding of plates from aluminium alloy AMg6, allowing for essentially non-uniform external temperature impact were developed for this purpose. The influence of the position of light-shade boundaries relative to the weld on the forming current and residual stressed state of aluminium plates in welding was analyzed. For this purpose the respective problems of nonstationary thermoplasticity were solved by finite element method, based on computational temperature field kinetics, determined allowing for the features of the impact of welding heat source and conditions of external heating and cooling. Performed calculations showed, in particular, that distribution of residual stresses forming in welded joints of plates from aluminium alloy AMg6 at different position of light-shade boundaries, is characterized by maximum stresses, which do not reach the base metal yield limit (170 – 180 MPa). Such stresses should not essentially lower the mechanical characteristics and performance of welded parts and components, produced in open space conditions. 6 Ref., 3 Fig.

Keywords: simulation of open space conditions, light-shade boundary, stressed state, mathematical modeling

Поступила в редакцию 20.11.2017



МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

VIII спеціалізована виставка «Метал. Обладнання. Інструмент 2018»

25–27 квітня 2018 р., Палац спорту «Україна», вул. Мельника, 18, м. Львів

Тематичні розділи виставки:

- ♦ обладнання для обробки металу ♦ металорізальні верстати та оснастка
- ♦ лазерне, плазмове обладнання і технології ♦ обладнання для розкрою листа і прокату
- ♦ металорізальні інструменти ♦ зварювальне обладнання ♦ ковальське обладнання та ін.

Детальна інформація про проект та архів заходів на сайті: <http://met.expolviv.ua>

9 Международная конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

17–19 сентября 2018 г.

г. Санкт-Петербург (г. Пушкин)

Тематика конференции

- Физические основы и математическое моделирование лучевых технологий. CAD-CAM-CAE системы.
- Оборудование и технологии сварки, наплавки и термообработки.
- Оборудование и технологии аддитивного производства.
- Оборудование и технологии резки, прошивки отверстий и обработки поверхности.
- Метрология, системы измерений и дефектоскопия.

Официальные языки конференции: английский, русский

www.ilwt-stu.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ*

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, В. А. МАТВЕЙЧУК, М. О. РУСЫНИК

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

Отмечена перспективность изготовления широкой номенклатуры деталей и узлов летательных аппаратов и двигателей с применением электронно-лучевых технологий. В работе рассмотрены особенности создания такой технологии с использованием отечественного сырья в виде порошковых материалов, либо присадочной проволоки. На лабораторном оборудовании изготовлены цилиндрические и прямоугольные образцы, что свидетельствует о возможности реализации аддитивной технологии для нужд промышленности. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, изделия заданной формы, метод 3D печати, порошковые материалы, присадочные проволоки, лабораторная установка

Инновационные технологии послойного производства изделий методом быстрого прототипирования открывают новые возможности для изготовления деталей заданной формы и структуры с заранее прогнозируемыми свойствами.

Процесс производства изделий таким методом с применением электронного луча относительно новый, но уже успешно показавший большие перспективы своего использования в промышленности для изготовления широкой номенклатуры как деталей и узлов летательных аппаратов, так и газотурбинных двигателей. В его основу положена операция послойного сплавления металлического порошка или присадочной проволоки в вакууме с помощью электронного луча. Этот подход отличает быстрый переход к изготовлению трехмерных изделий непосредственно от системы автоматизированного проектирования с возможностью использования широкого спектра металлов и сплавов, в том числе тугоплавких и химически активных. Все существующие на сегодня промышленные разработки принадлежат зарубежным компаниям [1]. Использование технологий и машин для прототипирования в нашей стране связано с их покупкой за рубежом с последующими значительными затратами на приобретение необходимых порошков [2], которые являются расходным и дорогостоящим компонентом этой технологии.

Целью настоящей работы является создание аддитивных технологий производства изделий заданной формы и структуры методами послойного электронно-лучевого сплавления металлов в

вакууме с применением порошковых материалов Electron Beam Melting (EBM) и присадочной проволоки Direct Manufacturing (DM), изготавливаемых в Украине.

Для этого необходимо:

- провести исследование свойств и возможности применения металлических порошков и присадочных проволок для реализации аддитивного процесса изготовления и ремонта изделий авиакосмической промышленности, турбиностроения, машиностроения и медицины;

- разработать конструкторскую документацию на основные узлы 3D принтера для каждого из исследуемых аддитивных процессов и изготовить экспериментальное лабораторное оборудование;

- разработать программное обеспечение для проведения исследований двух аддитивных процессов с использованием электронного луча (EBM и DM) [3];

- разработать аддитивные электронно-лучевые технологии EBM и DM, а также исследовать свойства многослойного наплавленного металла;

- создать промышленный макет оборудования в комплекте с программным обеспечением применительно к промышленности Украины.

Актуальность работы: разрабатываемые технологии и оборудование позволят производить металлические изделия методом быстрого прототипирования с использованием отечественного сырья.

Создаваемые технологии и оборудование изначально ориентированы на потребности отечественных предприятий. Для производства предполагается применять необходимое производителю недорогое отечественное сырье. Этот подход обеспечит возможность изготовления деталей и узлов методом быстрого прототипирования, исходя из

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

нужд потребителя и в тесном контакте с ним. Разрабатываемые технологии позволят снизить сроки внедрения новых видов продукции, расширить ее ассортимент, а также создавать принципиально новые виды изделий с заранее прогнозируемыми свойствами, производство которых невозможно без применения методов 3D печати.

Поскольку установок отечественной разработки для 3D печати не существует, актуально создание в Украине оборудования и программного обеспечения к нему для реализации аддитивного электронно-лучевого производства, свободного от импортного сырья, ориентированного на внедрение на предприятиях авиакосмической промышленности и турбиностроения: ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», ГП «ЛРЗ «Мотор», АО «Мотор Сич» и ГП «КБ «Южное».

Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением порошковых материалов ЕВМ. Технология электронно-лучевой наплавки ЕВМ подобна применяемой в промышленности селективной лазерной наплавке. Главное отличие заключается в использовании электронной пушки вместо лазера в качестве источника энергии для плавки. В основе технологии лежит использование пучка электронов высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели. В отличие от технологий лазерного спекания, электронно-лучевая наплавка позволяет увеличить производительность за счет высокой мощности пушек и электромагнитной, а не электро-механической, развертки электронного пучка.

Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные из файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контур слои модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим порошок в местах соприкосновения. Плавка производится в вакуумных рабочих камерах, что позволяет работать с химически активными металлами, чувствительными к окислению, например, с титаном и его сплавами.

Электронно-лучевая наплавка проводится при повышенных температурах, достигающих порядка 700...1000 °С, что позволяет создавать детали с меньшими остаточными напряжениями, вызываемыми градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия — отсюда максимальная прочность.

Для развития аддитивных технологий в Украине ГП «ГНИП Институт титана» совместно с

НИЦ «Титан Запорожья» предлагают инновационную технологию производства порошков титана низкой себестоимости методом гидрирования-дегидрирования (HDH) из титана губчатого или других титаносодержащих материалов различного качества и фракционного состава [4]. Применение таких порошков для аддитивного производства представляется перспективным при наличии соответствующего оборудования для 3D печати.

Учитывая изложенное выше, специалистами ИЭС им. Е. О. Патона начаты исследования в области разработки технологий и оборудования для аддитивного производства металлических изделий методом быстрого прототипирования с использованием сырья ГП «ГНИП Институт титана» и НИЦ «Титан Запорожья». Получены опытные образцы изделий заданной формы и разработан проект лабораторного оборудования для 3D печати на базе установки для электронно-лучевой сварки типа СВ-212. Блок-схема оборудования представлена на рис. 1.

Для формирования зоны плавления использован управляемый от компьютера генератор разверток. Пучок электронов отклоняется по осям X и Y и создает зону плавления заданной формы. Процесс наплавки выполняется по программе в соответствии с установленными технологическими режимами. Объектами управления являются ток пучка, ток фокусировки, отклонение пучка по осям X и Y .

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит в вакуумной камере при величине вакуума менее $1 \cdot 10^{-4}$ торр. Сфокусированный пучок электронов создает зону плавки и формирует изделие, перемещаясь по заданной траектории. Далее стол в оснастке опускается и наносится следующий слой порошка. Деталь «выращивается» послойно.

В качестве порошковых материалов применяли титановые HDH порошки, представляющие собой гранулы несферической формы титанового сплава BT1-0.

Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов HDH титана BT1-0 представлены в таблице.

По приведенной выше схеме получены образцы прямолинейной формы размерами $12 \times 12 \times 100$ мм (рис. 2). На рис. 2 видны верхний слой изделия 1, подложка 3 с промежуточными слоями наплавленного металла. На боковой поверхности присутствуют частицы нерасплавленного металлического порошка 2. Этот порошок в дальнейшем удаляется, а поверхность металла механически обрабатывается. После отработки режимов наплавки, учитывающих фракцию порошка, величину слоя и размер перекрытия слоев получены образцы для дальнейших ис-

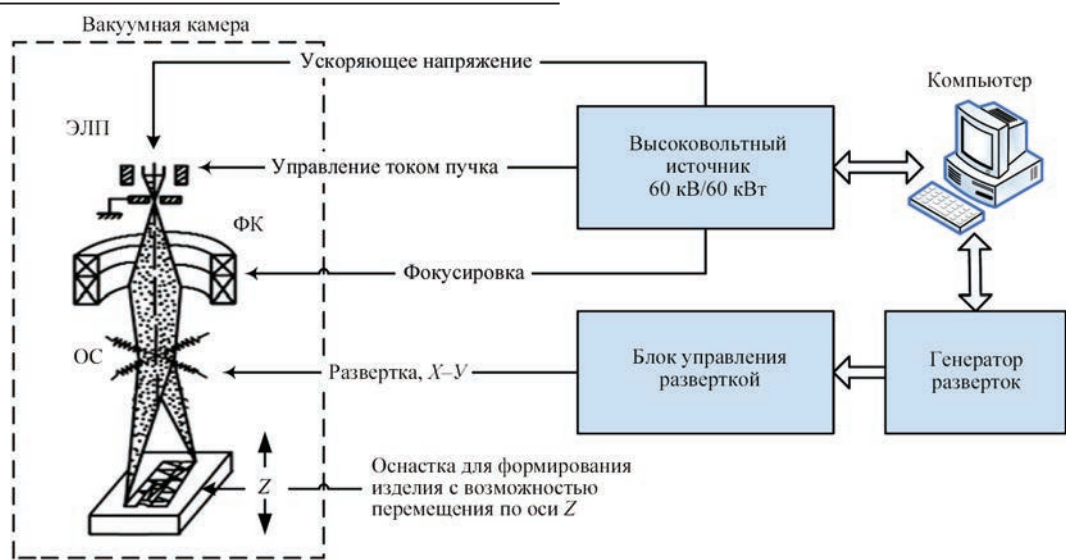


Рис. 1. Блок-схема оборудования для аддитивной электронно-лучевой наплавки: ЭЛП — электронно-лучевая пушка; ФК — фокусирующая катушка ЭЛП; ОС — отклоняющая система ЭЛП

следований. На рис. 3 представлен образец после механической обработки.

В различных сечениях образца проведены металлографические исследования микроструктуры наплавленного металла (порошок из титанового сплава BT1-0 наплавлен на основу из титанового сплава BT-20).

Структура наплавленного металла представляет собой характерную для литых титановых сплавов α -фазу, дефектов — пор и несплавлений в исследуемых образцах не обнаружено.

Разработанные элементы технологии послойного наращивания с использованием HDH порошков дают возможность изготовления деталей с плотной литой структурой металла без дефектов [5].

Полученные результаты дали основу для разработки проекта промышленного оборудования для аддитивного производства изделий с использованием порошковых материалов.

Оборудование создается на основе установки для электронно-лучевой сварки типа СВ-212М.

Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов HDH титана BT1-0

Фракция, мкм	Плотность, г/см ³	Содержание примесей, мас. %					
		N	C	H	Fe	Si	O
100...160	1,7	≤0,05	≤0,1	0,01...2,00	≤0,3	≤0,15	≤0,15
63...100	1,8	≤0,05	≤0,1	0,01...2,00	≤0,3	≤0,15	≤0,15

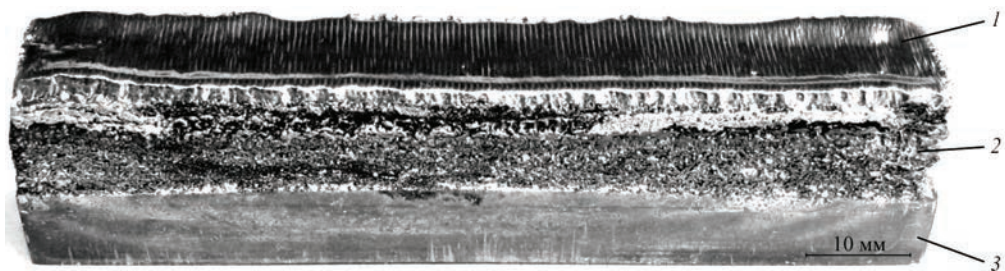


Рис. 2. Образец, изготовленный методом электронно-лучевой 3D-наплавки: 1 — верхний слой наплавленного металла; 2 — промежуточный слой металла с частицами нерасплавленного порошка по бокам образца; 3 — подложка из титана

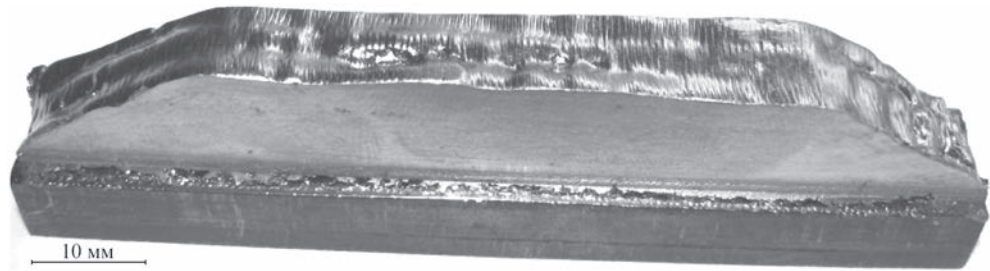


Рис. 3. Внешний вид образца после механической обработки

Предусматривается модернизация вакуумной камеры, разработка систем управления приводами перемещения стола по вертикали и узла распределения порошка в камере, а также разработка соответствующего программного обеспечения для воспроизведения аддитивного производства.

Схема установки представлена на рис. 4.

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит в вакуумной камере 1 при величине вакуума менее $1 \cdot 10^{-4}$ торр. Металлический порошок насыпью подается на рабочий стол 9 из бункеров 3. Рейка 4, перемещаясь вдоль стола 9, формирует на поверхности паллеты 7 слой порошка заданной толщины. В начальном положении паллета находится вверху шахты 8. Сфокусированный пучок электронов, сформированный ЭЛП 2, оплавляет поверхность порошка по заданной траектории. Таким образом, в соответствии с алгоритмом, формируются контуры изделия и его слой. Далее паллета 7 опускается на заданную величину и наносится следующий слой порошка. Процесс повторяется. Изделие 6 наращивается слой за слоем. В конце производственного цикла деталь извлекается из вакуумной камеры, очищается от нерасплавленного порошка 5 и механически обрабатывается.

Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением порошковых материалов позволяет создавать плотные металлические изделия заданной формы с высокой геометрической точностью. Габаритные размеры изделий составляют $200 \times 200 \times 200$ мм, а производи-

тельность электронно-лучевой наплавки по технологии ЕВМ не превышает 0,3 кг металлического порошка в час.

Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением присадочной проволоки DM. Вторым исследуемым процессом электронно-лучевого плавления металлов является процесс плавления металлической проволоки в вакууме с образованием последовательных слоев DM. Для разогрева и плавления проволоки используется электронный пучок требуемой мощности.

Схема процесса DM приведена на рис. 5.

Наплавка происходит в вакуумной камере. Присадочная проволока подается в зону воздействия пучка электронов, где нагревается и расплавляется. ЭЛП и/или подложка, на которой формируется изделие, перемещаются, формируя слой наплавленного металла. Изделие строится по цифровой модели. Данные САД-программы преобразуются в код ЧПУ. Деталь формируется послойно — каждый последующий слой металла наплавляется на предыдущий, слой за слоем, пока изделие не достигнет заданной формы. После чего оно подвергается термической и механической обработке.

Производительность электронно-лучевой наплавки по технологии DM варьируется от 3 до 9 кг металла в час в зависимости от выбранного материала и характеристик изделия, что делает его самым быстрым процессом аддитивного производства [6].

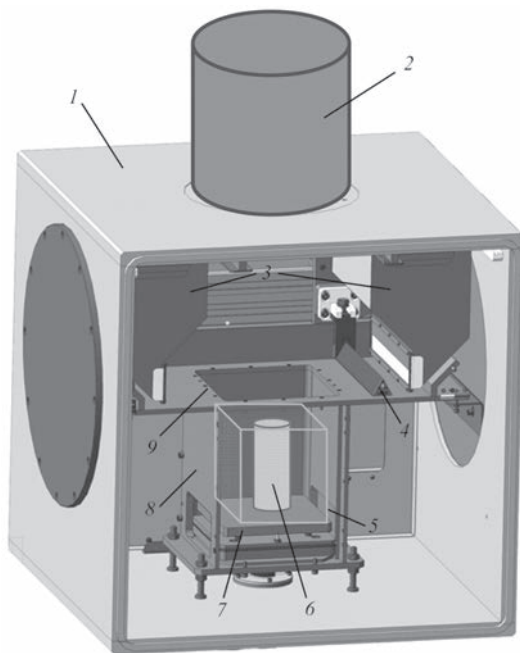


Рис. 4. Схема установки для аддитивного производства с применением металлических порошковых материалов (описание 1–9 см. в тексте)

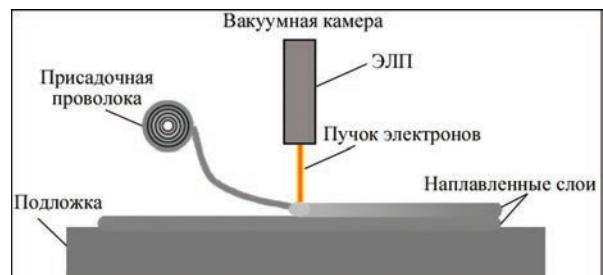


Рис. 5. Схема послойного электронно-лучевого плавления присадочной проволоки



Рис. 6. Расположение оборудования для наплавки проволокой в вакуумной камере (описание 1–6 см. в тексте)



Рис. 7. Образцы, изготовленные по технологии DM

Габариты изделий могут быть от миллиметров до нескольких метров и ограничиваются только размерами вакуумной камеры. Технология DM позволяет производить высококачественные крупногабаритные металлические конструкции длиной более 5 м.

Процесс электронно-лучевой наплавки проходит при величине вакуума менее $1 \cdot 10^{-4}$ торр, что позволяет эффективно работать с химически активными металлами — титан, алюминий и их сплавы, металлами из жаропрочных и др. сплавов, широко применяемых на предприятиях аэрокосмической отрасли и турбиностроения. Структура изделий, полученных по технологии DM, литая и бездефектная.

КПД установок для электронно-лучевой наплавки достигает 95 %, а количество отходов при механической обработке конечного изделия незначительное. Все это позволяет утверждать о высокой производительности и экологической чистоте аддитивного производства DM.

Изучалась возможность применения присадочных проволок из титанового сплава BT1-0, алюминиевого сплава ER 4043, стальной сварочной проволоки Св-08Г2С и проволоки из нержавеющей стали ER 308.

На базе оборудования для электронно-лучевой сварки типа KL-209 создана лабораторная установка для реализации аддитивного процесса DM. В вакуумной камере установки (рис. 6) расположены: ЭЛП 2 типа ЭЛА-60; многокоординатный модуль перемещения ЭЛП 4; механизм подачи присадочной проволоки 5 с катушкой 3 и вращатель 1. На вращателе находится изделие 6, полученное по технологии DM.

На лабораторном оборудовании получено удовлетворительное формирование круглых и прямоугольных образцов, из которых есть возможность составлять сложные геометрические формы в виде комбинации тел вращения и прямоугольников. Толщина стенок образцов варьировалась от 6 до 10 мм при использовании четырех типов проволок (рис. 7).

Поперечные сечения всех наплавленных образцов формируются как литой металл без включений и пористости.

В результате проведенных работ показана возможность производить изделия заданной формы методами аддитивной электронно-лучевой наплавки с применением отечественного сырья, что позволило приступить к разработке и изготовлению опытной установки для реализации 3D технологий в промышленности.

Список литературы

1. Смуров И. Ю., Кононов С. Г., Котобан Д. В. и др. (2015) *Разработка отечественных аддитивных технологий изготовления и контроля ответственных деталей машиностроения*. Реферат-презентация ФГБОУ ВПОМГТУ «СТАНКИН».
2. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Шевченко В. Г. и др. (2017) Получение деталей из сплавов титана аддитивными методами. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. **9**, 118–122.
3. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатным перемещением пушки и изделия. *Автоматическая сварка*, **5**, 3–7.
4. Жеманюк П. Д., Басов Ю. Ф., Овчинников А. В. и др. (2016) Применение титановых порошков нового поколения (HDH2) в аддитивных технологиях. *Авиационно-космическая техника и технология*, **8**(135), 139–144.
5. Нестеренков В. М., Матвейчук В. А., Русыник М. О., Овчинников А. В. (2017) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей

из порошков титанового сплава BT1-0. *Автоматическая сварка*, 3, 5–10.

6. *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*. <http://www.sciaky.com/additivemanu-facturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>. 2017.

References

1. Smurov, I.Yu., Kononov, S.G., Kotoban, D.V. et al. (2015) *Development of domestic additive technologies for manufacture and control of critical machine-building parts*. In: Synopsis-presentation of FGBOU VPOMGTU Stankin [in Russian].
2. Skrebtsov, A.A., Ovchinnikov, A.V., Shevchenko, V.G. et al (2017) Producing of parts from titanium alloys by additive methods. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroyeniye. Ser.: Starodubskie Chteniya*, 9, 118-122 [in Russian].
3. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, 5, 2-5.
4. Zhemanyuk, P.D., Basov, Yu.F., Ovchinnikov, A.V. et al. (2016) Application of titanium powders of new generation (HDH2) for the additive technology. *Aerospace tekhnica and technology*, 8(3), 139-144 [in Russian].
5. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. et al. (2017) Application of additive electron beam technologies for manufacture of parts of VT1-0 titanium alloy powders. *The Paton Welding J.*, 3, 2-6.
6. *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*, <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>. 2017.

В. М. Нестеренков, В. А. Матвійчук, М. О. Русинік

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

ОТРИМАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ 3D ДРУКУ

Відзначено перспективність виготовлення широкої номенклатури деталей і вузлів літальних апаратів і двигунів із застосуванням електронно-променевих технологій. У роботі розглянуто особливості створення такої технології з використанням вітчизняної сировини у вигляді порошкових матеріалів, або присадочного дроту. На лабораторному устаткуванні виготовлено циліндричні і прямокутні зразки, що свідчать про можливість реалізації адитивної технології для потреб промисловості. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променева наплавка, вироби заданої форми, метод 3D друку, порошкові матеріали, присадочні дроти, лабораторна установка

V.M. Nesterenkov, V.A. Matvijchuk, M.O. Rusynik

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

MANUFACTURE OF INDUSTRIAL PRODUCTS USING ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES FOR 3D-PRINTING

The prospects of manufacturing a wide range of parts and units of aircrafts and engines were noted using electron beam technologies. In the work the features of creating such technology are considered using the domestic raw materials in the form of powder materials or filler wire. In the laboratory equipment the cylindrical and rectangular specimens were manufactured, thus proving the possibility of implementing the additive technology for the needs of industry. 6 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Key words: electron beam surfacing, products of specified shape, 3D-printing method, powder materials, filler wires, laboratory equipment

Поступила в редакцию 28.11.2017

16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre
expoSilesia
www.exposilesia.pl

60th
International
Welding Conference
Organizer:
Institute of Welding

ExpoWELDING

IWS

International Welding Fair

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

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

ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ

А. И. БЕЛЫЙ, А. П. ЖУДРА, В. И. ДЗЫКОВИЧ, В. В. ПЕТРОВ

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

Рассмотрены особенности формирования композиционных сплавов на базе карбидов вольфрама при дуговой наплавке. Установлено, что при разработке электродного материала наиболее целесообразно в качестве износостойкой фазы применение сферических гранул карбидов вольфрама, которые в меньшей степени подвержены растворению в процессе наплавки. Установлено оптимальное содержание армирующей фазы в электродном материале, которое должно колебаться в пределах 60...70 % массы материала по объему. Разработана газшлакообразующая и легирующая системы и изготовлены опытные составы электродов. Опытным путем установлен ряд технологических особенностей по обеспечению однородности покрытия, состоящего из компонентов, различных по удельному весу и гранулометрическому составу, а также нанесению его на стержень электрода. Определены особенности процесса наплавки разработанными электродами, представлены результаты металлографических исследований наплавленного металла. Лабораторные испытания на абразивный износ композиционных сплавов опытными электродами показали их высокую эффективность. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: дуговая наплавка, композиционный сплав, покрытый электрод, карбид вольфрама, армирующие частицы, износостойкость

Существующие способы получения композиционных сплавов методом наплавки основаны на использовании эффекта армирования наплавленного металла частичками плавящихся карбидов вольфрама $WC + W_2C$ (релит), которые имеют высокую твердость ($HV 1800 \dots 2200$) и большой удельный вес. Наиболее распространенный способ получения композиционных сплавов — ручная ацетилено-кислородная наплавка с присадкой. В качестве присадочного материала чаще всего применяют разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона ленточный или, значительно реже, трубчато-зерновой релит, а также прутки или гибкие шнуры зарубежных фирм [1–3]. В последние годы получили распространение плазменно-порошковая и лазерная наплавки композиционных сплавов [4, 5]. В меньшей степени в настоящее время применяют индукционную или плазменную наплавку с присадкой порошка или ленточного электрода [6]. Известно также о применении печного способа получения композиционных сплавов [1, 7]. Однако большой объем подготовительных работ, применение в качестве матрицы низкотемпературных материалов и высокая энергоемкость сдерживают распространение указанного способа.

Все упомянутые выше способы наплавки нуждаются в стационарных постах и специализированном оборудовании. Однако возникают проблемы с наплавочными материалами при необходимости упрочнения деталей в полевых условиях и если затруднен демонтаж деталей. В таких случаях для дуговой полуавтоматической или ручной наплавки композиционных сплавов в Украине применяются

только импортные материалы. Как правило, это порошковые проволоки, электроды, прутки известных фирм DURUM, Castolin, Sulzer Metco Woka и др.

В связи с этим значительный интерес представляет разработка отечественных электродных материалов для дуговой наплавки композиционных сплавов. Применение электродуговой наплавки имеет целый ряд преимуществ перед другими способами: универсальность и простота технологического процесса; высокая производительность по сравнению с газовой наплавкой; низкие энергозатраты на наплавку; широкий диапазон регулирования основных параметров режима наплавки; возможность механизации и автоматизации процесса наплавки. Для реализации электродугового способа наплавки необходимо создание новых отечественных электродных материалов, позволяющих получать композиционные сплавы с заданными высокими служебными характеристиками. Максимальная эффективность таких сплавов достигается за счет оптимальной концентрации армирующей фазы, которая в наибольшей мере определяет износостойкость наплавленного металла, а также работоспособностью матрицы (износостойкость, трещиностойкость, пористость и т. д.). При этом износостойкость полученных сплавов в значительной мере также зависит от химического состава матрицы, который определяется степенью растворения гранул карбида вольфрама вследствие диффузии вольфрама и углерода в сварочной ванне при наплавке. Также это приводит к снижению концентрации армирующей фазы и

увеличению хрупкости матрицы за счет образования вторичных сложных железобольфрамидов карбидов [8, 9]. Особенно это проявляется при использовании гранул карбида вольфрама, полученных традиционным путем дробления слитков. Как правило, такие гранулы поражены множеством трещин, имеют неправильную форму и острые углы, что способствует их значительному растворению в жидком матричном расплаве.

Работы по созданию технологии распыления тугоплавких соединений, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона, позволили выйти на промышленный выпуск гранул плавленых карбидов вольфрама сферической формы практически всех фракционных составов от 0,05 до 0,8 мм. Прочность сферических частиц в 1,5...1,7 раза выше прочности дробленых зерен аналогичного состава, а микротвердость после распыления выросла до $HV_{2800} \dots 3000$ [10]. При этом исследованиями установлено, что благодаря сферической форме армирующих частиц удалось значительно снизить растворение их при наплавке и уменьшить переход вольфрама и углерода из армирующих частиц в матрицу. Так, при газовой наплавке ленточным релитом с дроблеными армирующими зернами размером 0,45...0,63 мм, среднее содержание вольфрама в матрице композиционного сплава достигает 18...20 %, а со сферическими армирующими зернами такого же размера 11...12 % [10]. Таким образом, при разработке нового электродного материала было целесообразно в качестве армирующей фазы использовать сферические гранулы карбида вольфрама $WC + W_2C$ и тем самым обеспечить их минимальное растворение в сварочной ванне.

Известно, что соотношение между содержанием армирующих частиц и сплавом-связкой композиционного сплава является одним из определяющих условий износостойкости сплава в целом. Данное соотношение зависит от вида и конструкции присадочного материала, гранулометрического состава армирующих частиц и должно находиться в пределах 60...70 %, что обеспечивает содержание износостойкой фазы в наплавленном слое порядка 40 % по объему и его высокую износостойкость. Это соотношение легло в основу создания нового наплавочного электродного материала.

Главной особенностью разрабатываемых электродов является то, что армирующие гранулы вводят в состав покрытия электродов, которое в результате состоит из компонентов, значительно отличающихся между собой размером и удельной массой частиц. Это потребовало в дальнейшем определенных технологических приемов при изготовлении электродов такого состава. В качестве износостойкой составляющей применяются гранулированные частицы карбидов вольфрама сферической формы размером 0,45...0,63 мм, 0,63...0,80 мм. Выбор таких частиц обусловлен конструктивными особенностями оборудования

для производства электродов и требуемым коэффициентом массы покрытия.

Газошлакообразующая и легирующая система представлена традиционными шихтовыми компонентами, применяющимися для изготовления сварочных и наплавочных материалов. Гранулометрический состав шихтовых материалов находился в пределах 0,28...0,40 мм. В качестве газошлакообразующей системы принята система на основе мрамора и плакивошпатового концентрата. Раскисление сварочной ванны осуществлялось путем введения в состав покрытия электродов ферромарганца и ферросилиция. Для частичного ограничения образования в матрице наплавленного композиционного сплава хрупких железобольфрамидов структур в состав покрытия вводят легирующие ферросплавы, содержащие титан и ванадий.

Эти элементы имеют большее сродство к углероду, чем железо и вольфрам и, в первую очередь, образуют свои карбиды, снижая, таким образом, количество вторичных железобольфрамидов карбидных фаз. Учитывая приведенное выше различие компонентов по удельному весу и гранулометрическому составу, их смешивание проводилось с соблюдением необходимых технологических мер, обеспечивающих однородность состава покрытия. При этом, с учетом высокого коэффициента массы покрытия, опрессовка электродов проводилась на скоростях, значительно ниже обычных, установленных при изготовлении типовых электродов. Отношение массы сферических частиц карбидов вольфрама, находящихся в покрытии, к массе металлического стержня находилось в пределах 60...65 %.

Опытным путем установлены режимы сушки и прокалики электродов после опрессовки, при которых обеспечивается соответствующее качество покрытия. Прокалку электродов необходимо осуществлять в вертикальном положении с использованием специальных обойм, так как применение стеллажей для сушки в горизонтальном положении приводит к возможному искажению равномерности покрытия электрода, вследствие его большого удельного веса. Сушка и прокалка электродов проводится по следующему циклу:

- сушка электродов в вертикальном положении при комнатной температуре в течение 24 ч;
- предварительная прокалка электродов в печи при $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч;
- прокалка электродов в печи при $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч.

Для сравнительных исследований изготовления свыше десяти опытных составов присадочных материалов. Внешний вид электродов с частицами сферических карбидов вольфрама показан на рис. 1.

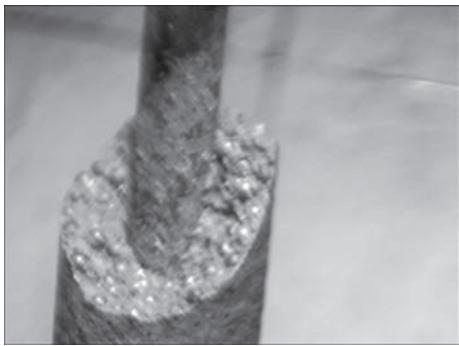


Рис. 1. Электрод для электродуговой наплавки композиционных сплавов

Для оценки технологических особенностей процесса наплавки разработанными электродами и металлографических исследований изготовлены образцы, наплавленные данными электродами. На рис. 2 представлена макроструктура наплавленного композиционного слоя. Концентрация армирующих частиц в плоскости шлифа составляет свыше 45 %.

Необходимо отметить, что процесс наплавки новыми электродами имеет свои технологические особенности. Прямое воздействие дуги на армирующие частицы может привести к их частичному разрушению, появлению мелких частиц карбидов вольфрама и повышению степени насыщения матричного расплава вольфрамом и углеродом.

В связи с этим, при наплавке требуется применение технологических приемов, обеспечивающих переход карбидов вольфрама из покрытия в сварочную ванну при минимальном воздействии дуги на армирующие частицы. Наплавка проводилась в нижнем положении с наклоном электрода вперед при небольших колебаниях, обеспечивающих некоторые запаздывания плавления обмазки и этим способствуя переходу значительной части армирующих частиц в сварочную ванну, минуя область высоких температур. Однако соблюдение указанных приемов не исключает диффузию вольфрама и углерода в сплав-связку. Поэтому полностью исключить образование в матрице сплава нежелательных структур, которые охрупчивают

Результаты испытаний образцов на абразивное изнашивание

Маркировка образца	Масса образца, г		Износ, г	Относительная износостойкость
	Начальная	После испытаний		
Сталь 45-1	11,6157	10,9912	0,6245	1,0
ОП-1	12,9226	12,8474	0,0752	8,3
ОП-2	12,7251	12,6587	0,0664	9,4
ОП-3	12,6434	12,5663	0,0771	8,1
Сталь 45-2	11,8264	11,0612	0,7652	1,0
ОП-4	13,0876	12,9895	0,0981	7,8
ОП-5	13,3317	13,2485	0,0832	9,2
ОП-6	12,9581	12,8659	0,0922	8,3
Сталь 45-3	11,7361	11,0518	0,6843	1,0
С-1	12,6769	12,5869	0,0900	7,6
С-2	12,4935	12,3985	0,0950	7,2
С-3	13,1079	13,0058	0,1021	6,7

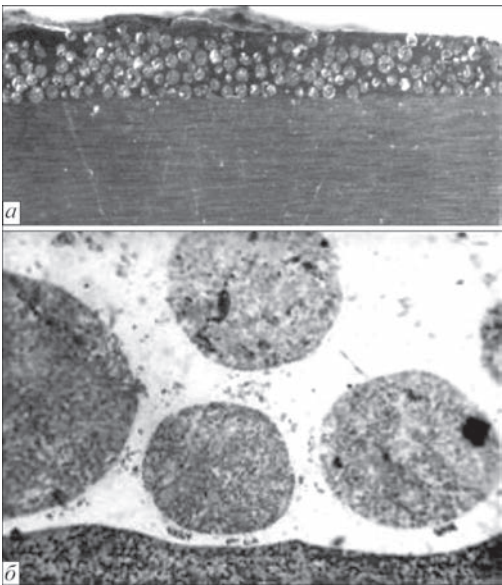


Рис. 2. Макроструктура композиционного сплава: а — $\times 80$; б — $\times 200$

матрицу, в виде вторичных железовольфрамовых карбидов и эвтектик невозможно. Результаты исследований микроструктуры композиционных сплавов, полученных при электродуговой наплавке, будут освещены в отдельной работе.

Для оценки износостойкости композиционных слоев, наплавленных опытными электродами, применялась методика испытаний на абразивное изнашивание на машине НК-М, заключающаяся в истирании образцов МИ-90, которые движутся по медной дорожке со скоростью 0,5 м/с под нагрузкой 30 Н. Путь трения составляет 800 м, абразивом служит кварцевый песок. В качестве эталона применяется образец, изготовленный из стали 45. Износостойкость оценивается по отношению потери массы образца эталона к потере массы испытуемого образца. Результаты испытаний представлены в таблице. Данные, приведенные в таблице, показывают, что композиционные сплавы, наплавленные с использованием опытных электродов (ОП-1...ОП-6) не уступают, а в некоторых случаях превосходят серийные (С-1...С-3) в 1,2...1,4 раза и могут успешно применяться для износостойкой наплавки различных деталей.

Выводы

1. На основе гранулированных карбидов вольфрама сферической формы разработаны электроды для дуговой наплавки композиционных сплавов, особенностью которых является введение армирующих гранул в состав покрытия электродов. Разработанные электроды обеспечивают концентрацию армирующих частиц в наплавленном композиционном слое не менее 40...50 %.
2. Разработана технология изготовления электродов, обеспечивающая однородность покрытия, состоящего из компонентов различных по удель-

ной массе и гранулометрическому составу. Определены особенности режимов сушки и прокалики электродов.

3. Результаты лабораторных испытаний на абразивное изнашивание позволяют прогнозировать высокие служебные характеристики разработанных электродов.

Список литературы

1. Жудра А. П. (2014) Наплавочные материалы на основе карбидов вольфрама. *Автоматическая сварка*, 6-7, 69–74.
2. (2016) *Weld hardface and cladding materials guide*. Oerlikon Metco, 8.
3. (2016) *Hard-facing materials*. DURUM Verschleiss-Schutz GmbH.
4. Harper D., Gill M., Hart K.W.D., Anderson M. (2002) Plasma transferred arc overlays reduce operating costs in oil sand processing. *International Thermal Spray Conf., March 4–6, 2002, Essen, Germany*, ASM International, pp. 278–293.
5. Сом А. И. (2004) Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов на базе литых карбидов вольфрама. *Автоматическая сварка*, 10, 49–54.
6. Белый А. И. (2010) Влияние основных технологических параметров плазменной наплавки ленточным релитом на свойства композиционного наплавленного металла. *Там же*, 6, 30–32.
7. Данилов Л. И., Ровенских Ф. М. (1973) Наплавка деталей засыпных устройств доменных печей композиционным сплавом. *Металлург*, 1, 18–21.
8. Фрумин Е. И., Жудра А. П., Пашченко М. А. (1979) Физико-химические процессы при наплавке ленточным релитом. *Сварочное производство*, 10, 27–32.
9. Жудра А. П., Махненко В. И., Пашченко М. А. и др. (1975) Особенности автоматической дуговой наплавки композиционных сплавов. *Автоматическая сварка*, 8, 16–19.
10. Дзыкович В. И., Жудра А. П., Белый А. И. (2010) Свойства порошков карбидов вольфрама, полученных по различным технологиям. *Там же*, 4, 28–31.

References

1. Zhudra, A.P. (2014) Tungsten carbide based cladding materials. *The Paton Welding J.*, 6-7, 66-71.
2. (2016) *Weld hardface and cladding material guide*. Oerlikon Metco, 8.
3. (2016) *Hard-facing materials*. DURUM Verschleiss-Schutz GmbH.
4. Harper, D., Gill, M., Hart, K.W.D., Anderson, M. (2002) Plasma transferred arc overlays reduce operating costs in oil sand processing. In: *Proc. of Int. Thermal Spray Conf., March 4-6, 2002, Essen, Germany*. ASM International, 278-293.
5. Som, A.I. (2004) Plasma-powder surfacing of composite alloys based on cast tungsten carbides. *The Paton Welding J.*, 10, 43-47.
6. Bely, A.I. (2010) Influence of main technological parameters of the plasma cladding process on properties of composite deposited metal. *Ibid.*, 6, 25-27.
7. Danilov, L.I., Rovenskykh, F.M. (1973) Surfacing of parts of charging equipment of blast furnace by composite alloy. *Metallurg*, 1, 18-21 [in Russian].
8. Frumin, E.I., Zhudra, A.P., Pashchenko, M.A. (1979) Physico-chemical processes in surfacing by strip relite. *Svaroch. Proizvodstvo*, 10 [in Russian].
9. Zhudra, A.P., Makhnenko, V.I., Pashchenko, M.A. et al. (1975) Peculiarities of automatic arc surfacing of composite alloys. *Avtomatich. Svarka*, 8, 16-19 [in Russian].
10. Dzykovich, V.I., Zhudra, A.P., Bely, A.I. (2010) Properties of tungsten carbide powders produced by different technologies. *The Paton Welding J.*, 4, 22-24.

О. І. Білий, О. П. Жудра, В. І. Дзикович, В. В. Петров

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

ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ СПЛАВІВ

Розглянуто особливості формування композиційних сплавів на базі карбідів вольфраму при дуговому наплавленні. Встановлено, що при розробці електродного матеріалу найбільш доцільно в якості зносостійкої фази застосування сферичних гранул карбідів вольфраму, які менше схильні до розчинення в процесі наплавлення. Встановлено оптимальний вміст армуючої фази в електродному матеріалі, який повинен коливатися в межах 60...70 % маси матеріала за об'ємом. Розроблено газошлакообразуюча та легуюча системи і виготовлені електроди розроблених складів. Дослідним шляхом встановлено ряд технологічних особливостей із забезпечення гомогенності покриття, що складається з компонентів різних за питомою вагою і гранулометричним складом, а також нанесення його на стрижень електрода. Визначено особливості процесу наплавки розробленими електродами, представлено результати металографічних досліджень наплавленого металу. Лабораторні випробування на абразивний знос композиційних сплавів розробленими електродами показали їх високу ефективність. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: дугова наплавка, композиційний сплав, покритий електрод, карбід вольфраму, армуючі частинки, зносостійкість

A.I. Belyi, A.P. Zhudra, V.I. Dzykovich, V.V. Petrov

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

ELECTRODES FOR ARC SURFACING OF COMPOSITE ALLOYS

This paper considers the peculiarities of formation of composite alloys based on tungsten carbides in arc surfacing. It is determined that application of spherical granules of tungsten carbides, which are to lower degree subjected to solution in process of surfacing, is the most reasonable in development of electrode material. The optimum content of reinforcing phase in electrode metal was determined which shall vary in 60-70% limits of material mass in volume. Developed were gas-slag-forming and alloying systems and pilot compositions of the electrodes were manufactured. A series of technological peculiarities on providing coating homogeneity, consisting of components different on specific gravity and grain-size composition, as well as its deposition on electrode rod were specified in experimental way. Determined were specifics of surfacing process using developed electrodes, presented are the results of metallographic examinations of deposited metal. Laboratory abrasive wear tests of composite alloys with pilot electrodes showed their high efficiency. 10 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: arc surfacing, composite alloy, coated electrode, tungsten carbide, reinforcing particles, wear-resistance

Поступила в редакцию 28.11.2017

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ФЛЮСА НА ПРОЦЕСС ТОРЦЕВОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ С РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Ю. М. КУСКОВ

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

Исследована возможность использования при торцевой электрошлаковой наплавке дискретным присадочным материалом в токоподводящем кристаллизаторе флюсов различных марок. Установлено, что выбор флюсов исходя только из их физических свойств (вязкости и электропроводности) не гарантирует получения необходимых условий осуществления электрошлакового процесса. Большое значение для нормальной работы кристаллизатора и выполнения качественной наплавки с хорошим формированием наплавленного металла имеет оптимальное расположение торцевой наплавляемой поверхности заготовки в рабочей полости кристаллизатора. С учетом сказанного выше для электрошлаковой наплавки дискретным материалом можно использовать флюсы АНФ-29, АНФ-32, АН-26. Библиогр. 20, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: торцевая электрошлаковая наплавка, флюс, дискретная присадка, токоподводящий кристаллизатор, ток, напряжение, стабильность процесса

Токоподводящий кристаллизатор (ТПК) представляет собой конструкцию секционного типа, совмещающую функции нерасходуемого электрода и формирующего наплавленный металл устройства [1, 2]. Его можно использовать как для электрошлаковой наплавки (ЭШН), так и электрошлакового переплава (ЭШП). При этом в качестве подаваемого в шлаковую ванну материала могут служить электроды и заготовки большого сечения, проволоки, ленты, твердая и жидкая присадки. Применение дискретной присадки представляется наиболее перспективным в связи с тем, что она не только формирует наплавленный слой, но и может оказывать инокулирующее воздействие на структуру кристаллизующегося металла.

Схема торцевой ЭШН дискретной присадкой в ТПК представлена на рис. 1.

ТПК используется в виде подвижного устройства, либо его устанавливают стационарно с перемещением относительно него наплавляемого слоя. При наплавке слоев относительно небольшой толщины (примерно ≤ 90 мм) ТПК может эксплуатироваться без относительного перемещения его и наплавленного металла. В этом случае формирующая секция кристаллизатора должна иметь высоту, обеспечивающую расположение в ней наплавляемого слоя. При толщине слоя ≥ 90 мм возникают сложности прогрева всего объема шлаковой ванны, ухудшается формирование металла. Конкретная толщина слоя с хорошим формированием, в конечном итоге, определяется физико-химическими свойствами применяемого флюса, а также видом и химическим составом наплавочного материала. Одним из основных этапов осуществления в ТПК электрошлакового

процесса является наведение в нем шлаковой ванны и сохранение ее стабильности (неизменности химического состава шлака и заданных электрических параметров процесса) в течение всего времени работы ТПК. Шлаковую ванну в кристаллизаторе можно наводить с использованием одного из двух известных технических способов — жидкого или твердого старта. В обычном кристаллизаторе шлаковую ванну оптимальной глубины (40...100 мм) формируют путем разовой заливки в него из флюсоплавильной печи необходимой порции шлака, либо получают тот же объем шлака путем закорачивания расходоуемого или нерасходуемого электрода на поддон (или наплавляемую заготовку) с постепенным наращиванием количества расплавленного флюса, переводя процесс из дугового в шлаковый.

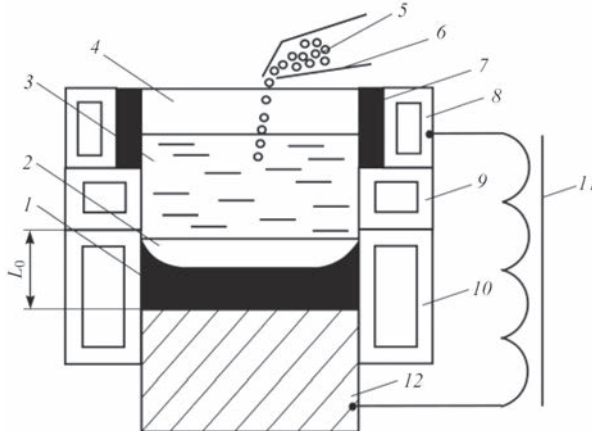


Рис. 1. Схема торцевой ЭШН дискретной присадкой в ТПК: 1 — наплавленный металл; 2 — металлическая ванна; 3 — шлаковая ванна; 4 — кристаллизатор; 5 — механизм подачи присадочного материала; 6 — дискретный присадочный материал; 7 — защитный слой (молибден, вольфрам и графит); 8–10 — секции кристаллизатора; 11 — трансформатор; 12 — заготовка

В ТПК заливаемая порция шлака может быть различного объема, в зависимости от положения заготовки или поддона относительно токоведущей секции кристаллизатора. Аналогичная ситуация и при выполнении твердого старта, когда объемом шлаковой ванны должен быть достаточным, чтобы произошло электрическое замыкание цепи токоведущая секция – шлак – поддон (либо заготовка). Именно это замыкание и позволяет обеспечивать нормальную работу ТПК и достаточно долго осуществлять электрошлаковый процесс без введения в рабочую зону каких-либо дополнительных устройств или электродов для поддержания шлаковой ванны в расплавленном состоянии.

Следует также отметить, что в зависимости от электрического режима наплавки и свойств шлака температура шлаковой ванны может значительно изменяться, а это, помимо отмеченного ранее влияния теплового состояния шлаковой ванны на качество наплавки, может вести к образованию на рабочей поверхности токоведущей секции неэлектропроводного или частично проводящего ток шлакового гарнисажа (твердой или полужидкой корочки), даже в том случае, если она защищена электропроводящей футеровкой, чаще всего графитовой. Появление гарнисажа затрудняет прохождение тока через один из элементов рабочей электрической цепи, нарушается стабильность процесса; в крайнем случае, электрошлаковый процесс полностью прекращается.

Таким образом, правильный выбор флюса (шлака) имеет первостепенное значение для нормальной работы ТПК. Необходимо принимать во внимание также стоимость флюса. Известно, что в себестоимости выплавки слитков ЭШП затраты на флюс составляют 2...6 % [3]. При ЭШН, когда, в основном, наплавляются относительно малые слои металла, эта величина естественно значительно возрастает.

С начала открытия в конце 1940-х – начале 1950-х годов электрошлакового процесса для его выполнения предложено более 50 марок флюсов. Основным компонентом флюсов является фтори-

стый кальций, характеризующийся наименьшим давлением паров при температурах электрошлакового процесса по сравнению с фторидами Al, Ba, Mg. Физические свойства расплавленного CaF_2 позволяют обеспечить стабильность процесса.

Для уменьшения электропроводимости, регулирования вязкости расплава, улучшения обескислоряющей способности, вводят оксиды Ca, Al, Mg. Содержание кремнезема как соединения менее термодинамически устойчивого, чем перечисленные оксиды, а также снижающего обескислоряющую способность шлака, обычно не превышает 2 %. Однако при кольцевой ЭШН, а также в практике ЭШП иногда применяют флюсы с повышенным содержанием кремнезема (АНФ-14, АНФ-25, АНФ-28, АНФ-29).

В настоящее время для осуществления электрошлакового процесса в ТПК используют флюсы различных марок в зависимости от химического состава переплавляемого металла, его вида и техники наплавки (в подвижном или стационарном кристаллизаторе). В качестве примеров такого подхода в выборе флюсов для работы с ТПК могут служить кольцевые ЭШН жидким металлом (хромистые чугуны, нержавеющие, инструментальные, быстрорежущие стали и др.) с взаимным перемещением наплавленного металла и кристаллизатора с использованием флюсов АН-75, АНФ-32, АНФ-94 [4–7]; переплав электродов и торцевая наплавка (титановые сплавы, медь, низколегированные и нержавеющие стали) на флюсах CaF_2 , АНФ-94, АНФ-28 [8–10]; ЭШП, торцевая и кольцевая наплавки с подачей в шлаковую ванну (АНФ-14, АН-75, АНФ-29, АНФ-28Н) дискретных присадок (хромистые и хромоникелевые чугуны, быстрорежущие и штамповые стали, медь и др.) [4, 10–13].

В данной работе рассмотрено влияние некоторых технологических параметров и химического состава флюсов на стабильность электрошлакового процесса в ТПК при торцевой ЭШН дискретной присадкой. В этом случае с помощью правильно выбранного флюса необходимо обеспечить, помимо хорошего формирования наплавляемого металла с самого начала наплавки и полного расплавления присадки, также качественное соединение основного и наплавленного металлов. Последнее представляет достаточно сложную задачу по сравнению со способом ЭШП, в частности, при выполнении которого удаляемая нижняя (донная) часть слитка может достигать 15 % его массы [14]. Поэтому данная задача будет рассмотрена в последующих статьях.

Для предварительного рассмотрения были выбраны флюсы, нашедшие приме-

Таблица 1. Флюсы, предварительно выбранные для рассмотрения возможности их применения в исследованиях

Марка флюса	Химический состав флюсов, мас. %					
	CaF_2	Al_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	MnO
АНФ-14	60...65	10...12	≤ 8	14...16	4...8	-
АНФ-29	37...45	13...17	24...30	11...15	2...6	-
АНФ-32	34...42	24...30	20...27	5...9	2...6	-
АНФ-94	34...40	17...21	11...22	14...20	7...11	≤ 2
АН-75	56...59	9...12	6...8	18...21	6...8	5...7
АН-90	39,0	10,5	23,5	26,5	0,5	-
АН-22*	20...24	19...23	12...15	18...22	12...15	7...9
АН-26	20...24	19...23	4...8	29...33	15...18	2,5...4

* Флюс дополнительно содержит $\text{N}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ в количестве 1,3...1,7 мас. %.

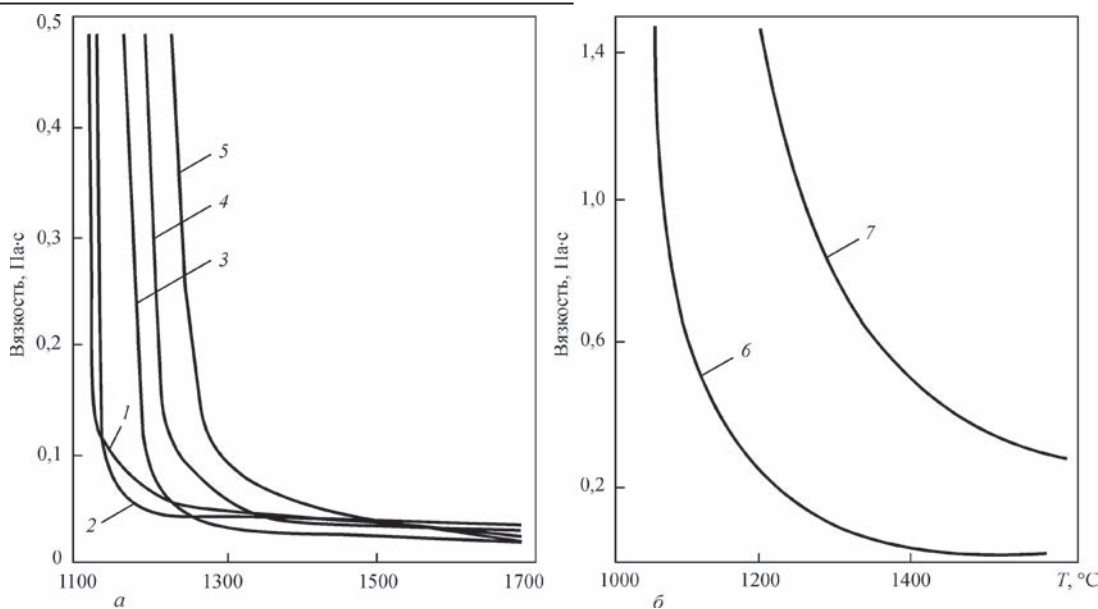


Рис. 2. Зависимость вязкости флюсов от температуры [15–18]: *а* — силикофторидные, *б* — оксидные флюсы: 1 — АНФ-14; 2 — АН-75; 3 — АНФ-29; 4 — АНФ-32; 5 — АНФ-94; 6 — АН-22; 7 — АН-26

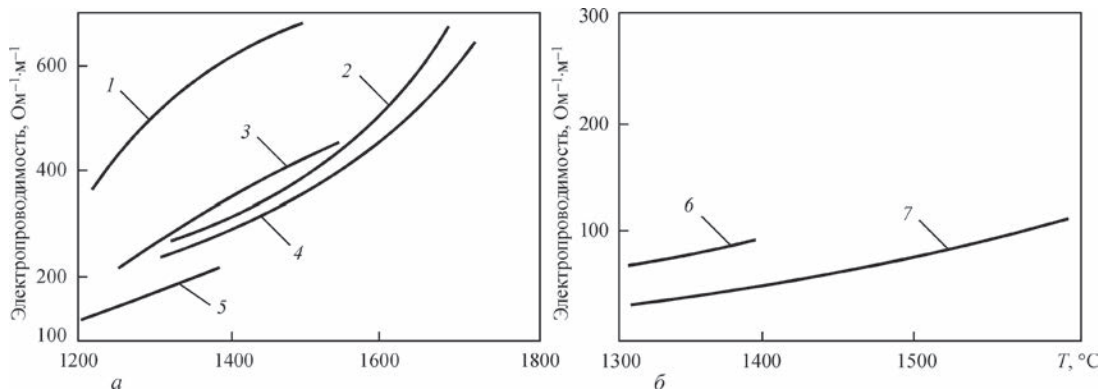


Рис. 3. Зависимость электропроводности флюсов от температуры [15–18]: *а* — силикофторидные, *б* — оксидные флюсы: 1 — АН-75; 2 — АНФ-29; 3 — АНФ-94; 4 — АНФ-32; 5 — АНФ-14; 6 — АН-22; 7 — АН-26

нение как в электрошлаковых, так и дуговых (АН-22, АН-26) процессах. Марки флюсов и их состав по ТУ представлены в табл. 1. Зависимость основных физических показателей шлаков — вязкости и электропроводности от температуры представлены на рис. 2 и 3 [15–18]. По флюсу АН-90 данные по физическим свойствам отсутствуют.

Основные технико-экономические показатели электрошлаковых процессов и, соответственно, критерии выбора флюсов были следующие:

Оксидно-фторидный флюс АНФ-14 используется при электрошлаковой сварке сталей, а также при ЭШН чугунов, в частности, ЭШН электродом — трубой валков горячей прокатки [4]. При ЭШН чугуновой дробью в ТПК в ряде случаев в наплавленном металле и по границам сплавления основного и наплавленного металлов наблюдались шлаковые включения. Это связано с охлаждающим действием подающихся в шлаковую ванну дробин в отличие от перегретых капель с оплавливающегося конца расходующего электрода. В промышленном масштабе не производится.

Флюсы АНФ-29 и АНФ-32 предназначены для ЭШП в подвижных кристаллизаторах благодаря введению в их состав повышенного количества SiO_2 [19]. Наличие в шлаке на основе фтористого кальция повышенного содержания оксида кремния способствует получению тонкой гарнисажной корочки и хорошему формированию наплаваемой поверхности в широких пределах изменения режимов плавки. Производятся в промышленном масштабе.

Флюс АНФ-94. Разработан для кольцевой ЭШН жидким металлом (быстрорежущие стали) в ТПК [10]. Как и в случае с флюсом АНФ-14, условия существования шлаковой ванны при подаче жидкой и твердой присадки существенно отличаются. В промышленном масштабе не производится.

Флюс АН-75. Модификация флюса АНФ-14 за счет введения в его состав 5...7 % MnO . При ЭШН чугуновой дробью в подвижном ТПК он обеспечивает хорошее формирование чугуна и сплавление основного (сталь, чугун) и наплавленного металлов [4]. При наплавке стальной

дробью ухудшается формирование металла, в наплавленном слое встречаются нерасплавленные частицы дробы. В промышленном масштабе не производится.

Флюс АН-90. Разработан для ЭШН лентами нержавеющей сталей при свободном формировании наплавленного металла. Обеспечивает хорошее формирование металла, легкую отделимость шлаковой корки, поддержание стабильного электрошлакового процесса при малой глубине шлаковой ванны, низкую склонность к гидратации [20]. В промышленном масштабе не производится.

Флюс АН-22. Используется как для электродуговой сварки, так и наплавки высоколегированных сталей. Преимуществом флюса можно считать относительно малое содержание остродефицитного CaF_2 . В промышленном масштабе не производится.

Флюс АН-26. Использование и преимущества аналогичны флюсу АН-22. В промышленном масштабе производится в стекловидном варианте (АН-26С).

В результате выполненного анализа для исследований были приняты флюсы АНФ-29, АНФ-32, АН-90, АН-22 и АН-26. Причем наибольшие сомнения вызывало применение флюсов АН-90 и АН-22. Первый — по причине неизвестности его поведения при ЭШН в водоохлаждаемых кристаллизаторах; второй — из-за наличия в его составе около 2 % оксидов натрия и калия, что предположительно будет затруднять сохранение их содержания во время наплавки.

В связи с этим исследования были разделены на два этапа. На первом была выполнена практическая проверка стабилизации электрошлакового процесса на флюсах АН-22 и АН-90 при кольцевой ЭШН в ТПК с уширенной верхней секцией и увеличенным диаметром наплаиваемой заготовки. Благодаря такой схеме наплавки удалось уменьшить объем шлаковой ванны (2870 см^3) для улучшения условий ее прогрева. Но и в этом случае после заливки в кристаллизатор каждого из этих шлаков (жидкий старт) навести стабильную шлаковую ванну не удалось даже на максимальной степени источника питания.

Поэтому основные исследования (2 этап) были выполнены с использованием флюсов АНФ-29, АНФ-32 и АН-26 при торцевой наплавке в гладкостенном ТПК с объемом шлаковой ванны 3820 см^3 (примерно на 30 % большем, чем в опытах 1 этапа). Методика выполнения экспериментов была следующей (см. рис. 1). В ТПК диаметром 180 мм с помощью водоохлаждаемого электрода с графитовой насадкой на его конце на поверхности заготовки, постепенно расплавляя порции флюса, наводили шлаковую ванну до ее ка-

сания с токоведущей секцией кристаллизатора. С этого момента начиналась работа ТПК, а электрод извлекался из его рабочей полости. После трехминутного прогрева шлаковой ванны в нее порционно подавалась сухая мелкая стружка (после фрезерной обработки) следующего химического состава, мас. %: 0,50 С; 0,62 Si; 1,3 Mn; 3,30 Cr; 0,93 Ni; 0,15 Mo; ~1,0 Cu. Предварительно было установлено, какой массе стружки соответствует толщина наплавленного слоя. Все наплавки выполняли на максимальной IV ступени трансформатора ТШП-10. Первоначальное удаление наплаиваемой поверхности заготовки от верхнего торца формирующей секции (L_0) составляло 94 мм.

Во время наплавки определяли (по оценочным уровням) максимально возможное для каждого флюса удаление наплаиваемой поверхности заготовки от торца формирующей секции (L_0), а также токи и напряжения, соответствующие каждому положению уровня наплавленного металла.

Результаты выполненных экспериментов представлены в табл. 2. В результате анализа результатов измерений, технологических особенностей наплавки, а также показателей вязкости и электропроводности флюсов в зависимости от температуры (рис. 2, 3) можно сделать следующие выводы. Несмотря на относительно близкие показатели физических свойств флюсов АНФ-29 и АНФ-32, их поведение при наплавке имеет отличия. Каждая подача в шлаковую ванну стальной стружки уменьшала расстояние от поверхности наплавленного слоя до токоведущей секции, снижая электрическое сопротивление на участке секция – шлак – наплавленный металл. При этом ток возрастает и для флюса АНФ-29 примерно на третьем уровне оценки шлаковая ванна уже активно вращается в горизонтальной плоскости, спокойно поглощая подаваемые порции присадки. При использовании флюса АНФ-32 первые порции стружки приходилось давать минимальной массы, так как тепловой мощности шлаковой ванны не хватало для расплавления больших порций присадки. При попытке повысить ее массовую скорость подачи стружка существенно ухудшала стабильность процесса за счет снижения температуры шлака. И лишь при достижении примерно 4–5 уровня процесс окончательно стабилизировался. Следовательно, для флюса АНФ-32 первоначальное значение L_0 должно быть равным около 70...75 мм.

Учитывая физические свойства флюса АН-26 (относительно низкая электропроводимость, повышенная вязкость и температура плавления), было решено опыты проводить при первоначальном значении $L_0 = 70 \text{ мм}$. Для этих условий наплавки шлаковая ванна, формируемая за счет расплавления флюса АН-26, наводится без каких-либо трудностей. При этом даже на II ступени источника питания. При самой наплавке (IV ст. источника) стружка активно

Т а б л и ц а 2. Электрические характеристики (*I*, кА, *U*, В) торцевой наплавки дискретной присадкой при определенном положении (*L*, мм) наплавленного слоя

Марка флюса	Измеряемые параметры	Оценочные уровни											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
АНФ-29	<i>L</i>	0	88	82	76	70	64	58	52	46	40	34	28
	<i>I</i>	0,98	1,55	1,97	2,04	2,05	2,26	2,30	2,38	2,46	2,6	2,68	2,73
	<i>U</i>	62,6	59,2	57,0	56,6	56,4	55,6	55,5	55,1	54,7	53,8	53,5	54,4
АНФ-32	<i>L</i>	0	88	82	76	70	64	58	52	46	40	34	28
	<i>I</i>	1,56	1,69	1,77	1,83	1,87	2,0	2,15	2,26	2,42	2,58	2,8	2,84
	<i>U</i>	34,5	43,8	42,6	42,6	41,5	40,0	37,6	34,4	34,2	31,2	30,2	27,3
АН-26	<i>L*</i>	0	65	60	55	50	45	40	35	-	-	-	-
	<i>I</i>	2,33	2,44	2,54	2,56	2,72	2,83	2,95	3,16	-	-	-	-
	<i>U</i>	57,3	57,2	56,6	56,6	55,6	54,8	54,5	53,4	-	-	-	-

* *L*₀ = 70 мм.



Рис. 4. Внешний вид боковой поверхности наплавленного слоя с использованием флюса АН-26 при первоначальном значении *L*₀, равном 70 мм (продольный шлиф наплавленной заготовки)

плавилась в шлаке, который при визуальной оценке имел более высокую температуру. Правильность выбора первоначального значения *L*₀ подтвердилась тем, что боковая поверхность наплавленного слоя, соответствующая подаче стружки 1-2 уровня, была чуть хуже сформирована, чем на остальных уровнях (рис. 4).

Выводы

- 1. При торцевой ЭШН дискретной присадкой в ТПК специфические условия функционирования ТПК выдвигают особые требования не только к физическим свойствам флюсов, но и к оформлению рабочего пространства кристаллизатора (расположению в нем наплавляемой заготовки).
- 2. Выбор флюсов исходя только из их физических свойств не гарантирует получения оптимальных условий осуществления электрошлакового процесса при ЭШН в ТПК.
- 3. «Длинные» флюсы АНФ-29 и АНФ-32 пригодны для выполнения торцевой ЭШН как в подвижных, так и стационарных ТПК. «Короткий» флюс АН-26 можно использовать в технологиях наплавки без относительного перемещения кристаллизатора и наплавленной заготовки. В обоих случаях при оптимальном расположении наплав-

ляемой торцевой поверхности в рабочей полости ТПК обеспечивается стабильный электрошлаковый процесс и хорошее формирование наплавленного металла.

Список литературы

- 1. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спец. электрометаллургия*, **2**, 32–40.
- 2. (1980) Фрумин И. И., Ксендзык Г. В., Ширин В. С. *Аппарат для электрошлакового переплава и наплавки*, США, Пат. 4185682.
- 3. Глебов А. Г., Мошквич Е. И. (1978) *Электрошлаковый переплав*. Москва, Металлургия.
- 4. (2015) Наплавка. Технологии, материалы, оборудование. *Сб. статей*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ.
- 5. Медовар Л. Б., Чернец А. В., Грабовский Ц. Ф. и др. (2000) Опыт изготовления и применения быстрорежущих валков ЭШН ЖМ. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 3–9.
- 6. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Медовар Л. Б. и др. (1997) Электрошлаковые процессы без расходных электродов. *Там же*, **2**, 12–16.
- 7. Медовар Б. И., Саенко В. Я., Медовар Л. Б. (2000) Получение заготовок коррозионностойкого биметалла методом электрошлаковой наплавки. *Там же*, **2**, 3–11.
- 8. Медовар Л. Б., Бенц М. Дж. (1998) Токоведущий кристаллизатор для электрошлакового рафинирования титановых сплавов с независимым управлением температурой шлака, скоростью вращения шлака и скоростью расплавления электрода. *Там же*, **4**, 13–15.
- 9. Зайцев В. А., Медовар Л. Б., Тищенко П. И. и др. (2011) Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов печей постоянного тока. *Современная электрометаллургия*, **2**, 3–7.
- 10. Медовар Л. Б., Цыкуленко А. К., Чернец А. В. и др. (2000) Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 3–7.
- 11. Kuskov Yu. M. (2003) A New Approach to Electros slag Welding. *Welding Journal*, **4**, 42–45.
- 12. Кусков Ю. М., Безкоровайный В. И., Ус В. И., Медовар Л. Б. (1992) Безэлектродная технология электрошлакового переплава медных отходов. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 29–32.
- 13. Кусков Ю. М., Гордань Г. Н., Богайчук И. Л., Кайда Т. В. (2015) Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 34–37.
- 14. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. (1970) *Электрошлаковый переплав*. Москва, Металлургия.
- 15. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Шевцов В. Л. и др. (1968) *Металлургия электрошлакового процесса*. Киев, Наукова думка.

16. Подгаецкий В. В. Кузьменко В. Г. (1988) *Сварочные шлаки. Справочное пособие*. Киев, Наукова думка.
17. Козин Р. В., Григоренко Г. М. (2016) Физико-химические свойства флюсов для электрошлаковых технологий. *Современная электрометаллургия*, **4**, 10–15.
18. Истомин С. А., Пастухов Э. А., Денисов В. М. (2009) *Физико-химические свойства окисно-фторидных расплавов*. Екатеринбург, Уральское отделение РАН.
19. Артамонов В. Л., Медовар Б. И., Лихачева Т. Н., Ждановский А. А. (1976) Новые флюсы АНФ-28, АНФ-29 и АНФ-32 для ЭШП в подвижных кристаллизаторах. *Спец. электрометаллургия*, **30**, 33–38.
20. Каленский В. К., Панчишин Ю. А. (1990) Материалы и оборудование для антикоррозионной электрошлаковой наплавки двумя электродными лентами. *Сб. науч. тр. «Оборудование и материалы для наплавки»*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 96–100.
19. Artamonov, V.L., Medovar, B.I., Likhacheva, T.N. et al. (1976) New fluxes ANF-28, ANF-29 and ANF-32 for ESR in movable molds. *Spets. Elektrometallurgiya*, **30**, 33–38 [in Russian].
20. Kalensky, V.K., Panchishin, Yu.A. (1990) Materials and equipment for corrosion-resistant electroslog surfacing with two electrode strips. In: *Transact.: Equipment and materials for surfacing*. Kiev, PWI, 96–100 [in Russian].

Ю. М. Кусков

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ СКЛАДУ ФЛЮСУ НА ПРОЦЕС ТОРЦЕВОГО ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ПРИСАДНОГО МАТЕРІАЛУ

Досліджено можливість використання при торцевому електрошлаковому наплавленні дискретним присадним матеріалом в струмопідвідному кристалізаторі флюсів різних марок. Встановлено, що вибір флюсів виходячи тільки з їх фізичних властивостей (в'язкості та електропровідності) не гарантує отримання необхідних умов здійснення електрошлакового процесу. Велике значення для нормальної роботи кристалізатора і виконання якісного наплавлення з хорошим формуванням наплавленого металу має оптимальне розташування торцевої наплавленої поверхні заготовки в робочій порожнині кристалізатора. З урахуванням сказаного вище для електрошлакового наплавлення дискретним матеріалом можна використовувати флюси АНФ-29, АНФ-32, АН-26. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: торцеве електрошлакове наплавлення, флюс, дискретна присадка, струмопідвідний кристалізатор, струм, напруга, стабільність процесу

Yu.M. Kuskov

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

INFLUENCE OF FLUX COMPOSITION ON THE PROCESS OF ELECTROSLAG SURFACING OF END FACES WITH DISCRETE FEEDING OF FILLER MATERIAL

Applicability of fluxes of different grades at electroslog surfacing of end faces by discrete filler material in a current-conducting mould was studied. It is found that selection of fluxes proceeding just from their physical properties (viscosity and electric conductivity) does not guarantee the conditions required for conducting the electroslog process. Optimum position of the billed end face to be surfaced in the mould working cavity is very important for normal operation of the mould and performance of sound surfacing with good formation of the deposited metal. In view of the above-said, ANF-29, ANF-32, AN-26 fluxes can be used for electroslog surfacing with discrete material. 20 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: electroslog surfacing of end faces, flux, discrete filler, current-conducting mould, current, voltage, process stability

Поступила в редакцію 12.09.2017

References

1. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold providing rotation of slag pool. *Spets. Elektrometallurgiya*, **2**, 32–40 [in Russian].
2. (1980) Frumin, I.I., Ksyondzyk, G.V., Shirin, V.S. (1980) *Welding apparatus for electroslog remelting and surfacing*. Pat. 4185628 USA [in Russian].
3. Glebov, A.G., Moshkevich, E.I. (1978) *Electroslog remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. (2015) *Surfacing. Technologies, materials, equipment*. In: *Transact.* Kiev, PWI [in Russian].
5. Medovar, L.B., Chernets, A.V., Grabovsky, Ts.F. et al. (2000) Experience of manufacture and application of high-speed rolls of ESS LM. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 3–9 [in Russian].
6. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Medovar, L.B. et al. (1997) Electroslog processes without consumable electrodes. *Ibid.*, **2**, 12–16 [in Russian].
7. Medovar, B.I., Saenko, V.Ya., A.K., Medovar, L.B. (2000) Manufacture of billets of corrosion-resistant bimetal by electroslog surfacing method. *Ibid.*, **2**, 3–11 [in Russian].
8. Medovar, L.B., Bents, M.J. (1998) Current-supplying mold for electroslog refining of titanium alloys with independent control of slag temperature, speed of slag rotation and speed of electrode melting. *Ibid.*, **4**, 13–15 [in Russian].
9. Zajtsev, V.A., Medovar, L.B., Tishchenko, P.I. et al. (2011) Application of ESR on a two-circuit scheme for obtaining steel-copper billets of anodes of DC arc furnaces. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 3–7 [in Russian].
10. Medovar, L.B., Tsykulenko, A.K., Chernets, A.V. et al. (2000) Examination of influence of two-circuit scheme parameters of ESR on dimensions and shape of metal pool. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 3–7 [in Russian].
11. Kuskov, Yu.M. (2003) A new approach to electroslog welding. *Welding J.*, **4**, 42–45.
12. Kuskov, Yu.M., Beskorovajny, V.I., Us, V.I., Medovar, L.B. (1992) Electrodeless electroslog remelting technology of copper wastes. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 29–32 [in Russian].
13. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Bogajchuk, I.L. et al. (2015) Electroslog surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, **5–6**, 30–33.
14. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslog remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
15. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1968) *Metallurgy of electroslog process*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
16. Podgaetsky, V.V., Kuzmenko, V.G. (1988) *Welding slags: Welding manual*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
17. Kozin, R.V., Grigorenko, G.M. (2016) Physical-chemical properties of fluxes for electroslog technologies. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 10–15 [in Russian].
18. Istomin, S.A., Pastukhov, E.A., Denisov, V.M. (2009) *Physical-chemical properties of oxide-fluoride melts*. Ekaterinburg, Ur ORAN [in Russian].

ИНТЕРНЕТ-БАЗА ДАННЫХ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

В. Г. СОЛОВЬЕВ

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

Выполнен значительный объем работ по дуговым наплавкам самозащитной порошковой проволокой на плоской и цилиндрической поверхностях изделий, открытой дугой, под флюсом и в среде защитных газов, в широком диапазоне напряжений и токов дуги, при различных диаметрах проволоки и при различных скоростях наплавки с целью использования экспериментального материала для разработки алгоритмов автоматизации технологического процесса. В статье приводится решение по систематизации полученных в результате экспериментов данных, которое позволило всем участникам исследований иметь удаленный доступ к интернет-базе данных для её расширения, корректировки и анализа. Библиогр. 8, рис. 3.

Ключевые слова: автоматизация, база данных, дуговая наплавка, порошковая проволока

Комплексная автоматизация нелинейного многофакторного технологического процесса дуговой наплавки металлов требует привлечения значительных математических и вычислительных ресурсов по моделированию связей большого количества параметров, часть которых можно получить с помощью датчиков, а другую часть косвенным путем, используя аппарат регрессионного анализа, нейросетевых технологий, нечеткой логики и т. п. Кроме того, предполагается оптимизация процесса, а в данном случае оптимизация многокритериальная, что значительно усложняет синтез системы. В последнее время для автоматизации «диссипативных систем», к которым относится и дуговой процесс, все чаще применяют синергетические принципы синтеза [1], позволяющие стабилизировать соотношения между переменными состояниями процесса. Следствием этого факта является вырожденность уравнений динамики процесса дуговой наплавки и наличие интегральных инвариантов многообразий в пространстве его состояний. Инвариантные многообразия представляют собой «некоторые функции, которые во время движения не изменяются» [2]. Такие подходы к автоматизации нелинейных объектов значительно упрощают синтез системы и могут использоваться для решения конечных целей автоматизации, т. е. повышения качества производимой продукции при максимальном энергосбережении, однако требуют проведения значительного количества экспериментов для анализа. Для получения данных, характеризующих процесс дуговой наплавки, и которые в дальнейшем будут использоваться для анализа и синтеза системы автоматизации, проведен большой объем экспериментальных дуговых наплавки порошковой проволокой на

плоской и цилиндрической поверхностях изделий. Наплавки проведены открытой дугой, под флюсом и в среде защитных газов, в широком диапазоне напряжений и токов дуги, при различных диаметрах порошковой проволоки и при различных скоростях наплавки. Получены показатели качества наплавки и наплавленных валиков, являющиеся особо значимыми для автоматизации процесса.

Цель настоящей работы — создание интернет-базы данных результатов экспериментальных дуговых наплавки порошковыми проволоками для удаленного коллективного использования при создании автоматической системы регулирования процессом дуговой наплавки.

На рис. 1 представлен перечень входной и выходной информации процесса дуговой наплавки. Входными для процесса являются такие технологические параметры, как вид наплавки (наплавка открытой дугой, под флюсом или в среде защитных газов), марка порошковой проволоки и ее диаметр, вылет электрода, отклонение от экватора изделия (для наплавки на цилиндрической поверхности) и др. Регулирующими параметрами являются положение ручного задатчика напряжения источника питания, положение ручного задатчика скорости подачи электродной проволоки и положение ручного задатчика скорости наплавки на пульте управления установкой.

В ходе подготовки к проведению экспериментов разработано программное обеспечение в рамках автоматизированного получения статистических данных [3], которое позволило обеспечить контроль и цифровую регистрацию следующих параметров процесса дуговой наплавки:

- текущие значения напряжения источника $U_{\text{и}}(t)$;
- текущие значения тока наплавки $I_{\text{н}}(t)$;

- средние за время наплавки значения $U_n(t)$ и $I_n(t)$;
- текущие значения напряжения дуги $U_d(t)$ и тока дуги $I_d(t)$, при этом $U_d(t)$ и $I_d(t)$ определялись путем исключения из $U_n(t)$ и $I_n(t)$ значений напряжения и тока в промежутки времени появления коротких замыканий (КЗ) и обрывов дуги;
- средние за время наплавки напряжение дуги и тока дуги;
- ручной ввод и регистрацию заданий на напряжение дуги и тока дуги;
- ручной ввод и регистрацию значений положения ручного задатчика напряжения источника питания P_u , положения ручного задатчика скорости подачи электродной проволоки P_{vp} и скорости наплавки V_n ;
- средняя за время наплавки длительность КЗ;
- среднее за время наплавки напряжение КЗ;
- средний за время наплавки ток КЗ;
- средняя за время наплавки длительность обрывов дуги;
- вычисление и регистрацию таких статистических параметров, как СКО (среднее квадратичное отклонение) напряжения сварки и напряжения дуги; СКО тока сварки и тока дуги; СКО длительности, напряжения и тока КЗ; СКО длительности обрывов дуги;
- коэффициент нестабильности электрических параметров наплавки;
- тип каплепереноса металла «крупнокапельный», «капельный», «мелкокапельный» или «струйный»;
- расчет и фиксация оценки по средней длительности обрывов дуги. Определялось состояние: «обрывов нет», «допустимое количество

обрывов», «значительное количество обрывов», «много обрывов», «очень много обрывов» или «процесс нестабилен».

В течение экспериментов фиксировалось время проведения наплавки, вид наплавки, марка порошковой проволоки, диаметр проволоки, вылет электрода, вид поверхности заготовки, отклонение от зенита цилиндрической заготовки. Проводилось фотографирование наплавленных валиков, фиксация записей временных диаграмм по таким параметрам, как текущие напряжение сварки и ток сварки, текущие напряжение дуги и ток дуги.

В конце каждой наплавки автоматически формировался протокол наплавки в виде текстового документа.

По результатам экспертной оценки наплавленных валиков определено качество формирования валика: «плохое», «удовлетворительное» или «хорошее»; наличие пор: «пор нет», «отдельные поры» или «многочисленные поры».

При обработке макрошлифов получили такие параметры, как «доля основного металла в наплавленном» (ДОМ), площадь сечения валика, ширина валика, высота валика и глубина проплавления.

Анализ и обработка экспериментальных данных позволили получить многочисленный материал по взаимосвязям различных параметров, закономерностям их изменений в зависимости от начальных входных условий. Это зафиксировано [3, 4] в виде различных графиков, рисунков и таблиц.

В результате получен материал по дуговой наплавке около 250 экспериментальных валиков, каждый из которых характеризуется примерно



Рис. 1. Перечень входной и выходной информации технологического процесса дуговой наплавки

50 уникальными для каждого валика значениями перечисленных выше параметров, т. е. примерно 12500 данных [3]. Эти данные по своей структурированности полностью соответствуют определению нормализованной реляционной базе данных [5, 6], т. е. эти данные можно разместить в двумерной таблице, в которой отношения между информацией полностью определены. Первичным КЛЮЧОМ для такой таблицы является маркировка наплавленного валика. В строках таблицы в соответствующей клеточке размещены уникальные, принадлежащие только этому валику, параметры. Маркировки нанесены на изделие возле валика ударными клеймами по металлу таким образом, чтобы при дальнейшей порезке и обработке изделий маркировки не исчезли. Структура базы данных такова: ОБЪЕКТ — это валик, АТРИБУТЫ — это все перечисленные выше параметры, характеризующие наплавленный валик. В таблице количество строк (записей) соответствует количеству наплавленных валиков, а количество колонок (полей) соответствует количеству атрибутов.

Известны примеры базы данных режимов дуговой сварки в CO_2 , под флюсом и в среде инертных газов [7], которая создана на специализированном программном обеспечении, пригодном в использовании для номенклатуры изделий, характерных для данного машиностроительного предприятия, и только в рамках данного предприятия. Однако для коллективного исследования технологии дуговой наплавки самозащитной порошковой проволокой с целью автоматизации процесса данное программное обеспечение не подходит. На рис. 2 показана главная форма системы управления базой данных VCW VicMan's DataBase (в дальнейшем СУБД), которая нами первоначально

использовалась для систематизации и объединения (в виде базы данных наплавов) всего полученного материала в результате экспериментов. СУБД является простой и очень гибкой для создания небольших реляционных баз данных. Она позволяет создать до семи типов полей (текстовый, графический, файл любого формата, в виде списка, в виде флажка и др.). Позволяет редактировать базу данных, экспортировать в файл и импортировать из файла. Производит поиск по текстовым полям и сортировку записей в нужном порядке. Экспортирует базу данных в Microsoft Word, Excel, в файлы формата DBF и HTML. Однако она имеет ограничение по количеству полей до 30 шт. (в данном случае необходимо около 50 и более). Притом, как показала практика работы с базой наплавов, очень часто возникает необходимость произвести вычисления, используя информацию в таблицах, например, определить сумму выделенных данных, определить значение коэффициента автокорреляции или взаимной корреляции, однако в данной СУБД такой возможности нет. Поэтому приходится производить экспорт данных в программу Excel, которая имеет достаточный арсенал инструментов анализа, расчетов и визуализации, и там производить необходимые вычисления. Кроме того, VCW VicMan's DataBase не может быть размещена на облачном ресурсе интернета, а без этого, в современных условиях, организация эффективной коллективной исследовательской работы над поставленной проблемой невозможна. База данных дуговых наплавов для ее заполнения и анализа требует участия различных групп экспертов, специализирующихся на определенных участках работы над поставленной задачей. При-

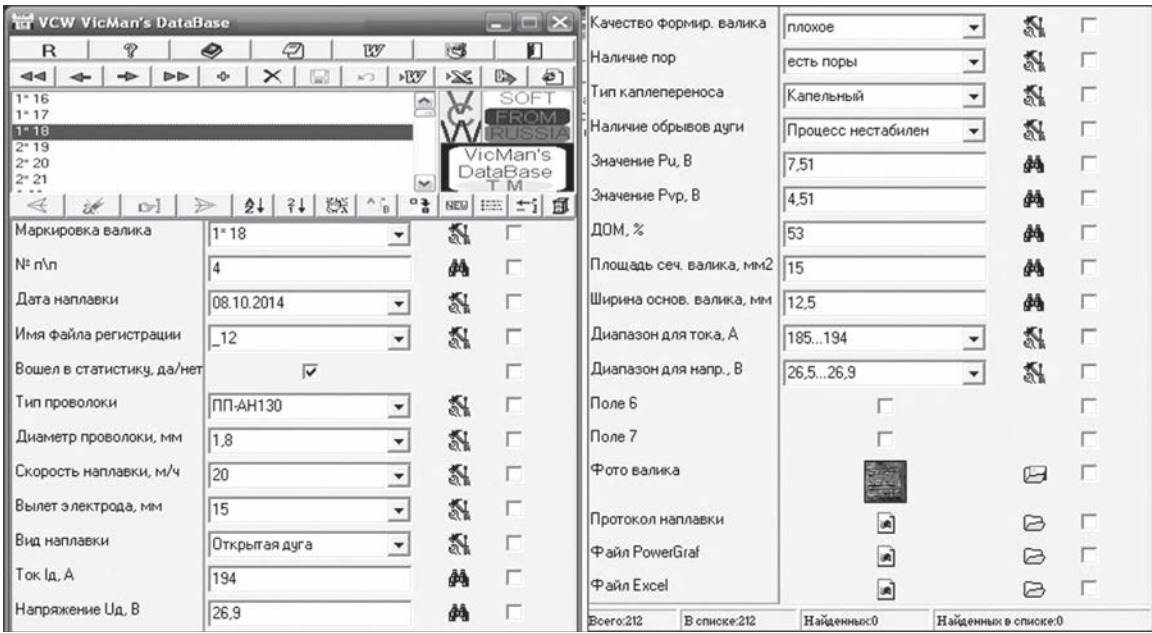


Рис. 2. База данных дуговых наплавов на VCW VicMan's DataBase

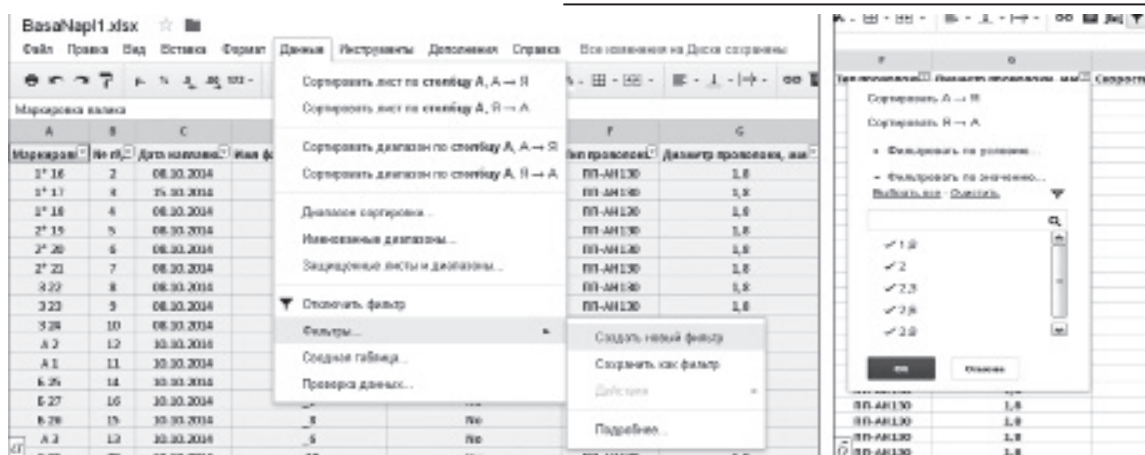


Рис. 3. Некоторые функции баз данных, реализованных в «Google Таблицы»: а — функция сортировки; б — функция фильтрации

чем осуществлять эту работу необходимо с различных рабочих мест.

Интернет-база данных (облачная база данных, веб-база данных) — электронная распределённая база данных, доступная по сети Интернет, в отличие от сосредоточенных баз данных, доступных только на отдельном компьютере или на подключенном к нему устройстве хранения, например, компакт-диске. Такие базы данных размещаются на серверах, обеспеченных веб-интерфейсом, что позволяет обращаться к ним с помощью широко распространённого программного обеспечения — каким-либо из общедоступных веб-браузеров. Интенсивное внедрение провайдером сервисов для облачных вычислений привело к тому, что стали все более востребованными интернет-базы данных. На рынке облачных баз данных работают такие сервисы, как Amazon Web Services (AWS), Google Cloud SQL, Microsoft Azure, SAP, Oracle и др., которые привлекательны для заказчиков баз с большим распределённым объемом данных и для которых такое сотрудничество является рентабельным.

Создать реляционную базу данных можно также и в программном пакете Microsoft Excel. В этом случае Excel будет выполнять, в некотором смысле несвойственную для нее, роль СУБД, но, тем не менее, часто выполняемую [8]. Если создаваемая в Excel реляционная база данных не нормирована, т. е. имеет несколько значений в одной клетке таблицы, то приходится создавать дополнительную таблицу, связанную с первой, что усложняет работу с Excel как с системой управления базой данных. В нашем же случае база данных наплавков нормирована и может быть размещена в одной таблице. К тому же, при необходимости, в поля таблицы можно вводить гиперссылки на графический, текстовый или иной документ, а также исполняемый файл, что является очень удобным, но поиск по этим полям в Excel невозможен.

В настоящее время облачный ресурс «Google Диск» предоставляет для свободного пользования более 15 Гб облачной памяти для защищенного хранения файлов, в том числе документов Microsoft Word, Excel, фотографий, видео. Тем самым дает возможность другим пользователям просматривать, редактировать и копировать документы. В приложении «Google Таблицы» можно достаточно комфортно работать с файлами Excel, практически не хуже чем в Microsoft Office Excel. Причем работать можно не только в онлайн, но и в автономном режиме с последующей синхронизацией с «Google Таблицы» при включении интернета, а также работать на смартфоне с установленной OS Android 4.0 и более поздних версий. Кроме того, «Google Таблицы» предоставляет возможность одновременной совместной работы над таблицами неограниченному количеству сотрудников, получивших у администратора право доступа.

Облачная база данных результатов дуговых наплавков, созданная в «Google Таблицы», позволяет редактировать данные, управлять ими, проводить сортировку (рис. 3, а), фильтрацию по столбцам (рис. 3, б), а также создавать отчеты на основе данных, хранящихся в электронных таблицах. В базу данных можно вводить результаты вручную или импортировать их в «Google Таблицы». Если данные относятся к другим программам, то перед импортом их нужно будет сохранить в формате Excel, после чего импортировать в «Google Таблицы». В приложении «Google Таблицы» можно подсчитать результат по самым разным критериям:

- сумма — суммирует данные;
- счет — подсчитывает количество ячеек в числовом диапазоне;
- среднее значение — вычисляет среднее арифметическое выбранного диапазона данных;

- минимальные и максимальные значения — отображает самые низкие и самые высокие показатели выделенного диапазона;
- произведение — вычисляет произведение данных;
- стандартное отклонение — оценивает стандартное отклонение по выборке;
- дисперсия — оценивает дисперсию по выборке и др.

Выводы

1. Исследованы и подтверждены возможности интернет ресурса «Google Таблицы» для создания вполне функциональной экономной базы данных процесса дуговой наплавки для коллективного использования.

2. Создана интернет-база данных результатов процесса экспериментальной дуговой наплавки порошковыми проволоками для ее удаленного коллективного использования при создании автоматической системы регулирования процессом дуговой наплавки.

Список литературы

1. Колесников А. А. (1994) *Синергетическая теория управления*. Таганрог, ТРТУ, Москва, Энергоатомиздат.
2. Владимирский Э. И., Исмаилов Б. И. (2011) *Синергетические методы управления хаотическими системами*. Баку, ELM.
3. Рябцев И. А., Ланкин Ю. Н., Соловьев В. Г. и др. (2015) Компьютерная информационно-измерительная система для исследования процессов дуговой наплавки. *Автоматическая сварка*, **9**, 34–37.
4. Ланкин Ю. Н., Рябцев И. А., Соловьев В. Г. (2014) Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволоки на стабильность процесса и проплавление основного металла. *Там же*, **9**, 27–31.
5. Коннолли Т., Бегг К., Страчан А. (2001) *Базы данных: Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика*. Пер. с англ. 2-е изд., испр. и доп. М., СПб., К., Вильямс.
6. Редмонд Э., Уилсон Дж. П. (2013) *Семь баз данных за семь недель. Введение в современные базы данных и идеологию NoSQL*. Жаклин Картер (ред.). Пер. с англ. Москва, ДМК Пресс.
7. Демченко В. Ф., Козлитина С.С. (2010) Банк данных режимов дуговой сварки в CO₂, под флюсом и в среде инертных газов. *Известия ТулГУ. Технические науки*, **4**, 1.
8. Долженков В. А., Стученков Ф. Б. (2007) Microsoft Office Excel 2007. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург.

References

1. Kolesnikov, A.A. (1994) *Synergic control theory*. Taganr. TRTU. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
2. Vladimirovsky, E.I., Ismailov, B.I. (2011) *Synergic methods of chaotic system control*. Baku, ELM [in Russian].
3. Ryabtsev, I.A., Lankin, Yu.N., Soloviov, V.G. et al. (2015) Computer information-and-measuring system for investigation of arc surfacing processes. *The Paton Welding J.*, **9**, 32-35.
4. Lankin, Yu.N., Ryabtsev, I.A., Soloviov, V.G. et al. (2014) Effect of electric parameters of arc surfacing using flux-cored

wire on process stability and base metal penetration. *Ibid.*, **9**, 25-29.

5. Connolly, T., Begg, C., Strachan, A. (2001) *Databases: Design, implementation and management. Theory and practice*. Moscow; St.-Petersburg; Kiev, Williams [in Russian].
6. Redmond, E., Wilson, J.P. (2013) *Seven databases in seven weeks. Introduction in current databases and NoSQL ideology*. Ed. by J. Carter. Moscow, DMC Press [in Russian].
7. Demchenko, V.F., Kozlitina, S.S. (2010) Database of modes of CO₂-, flux-cored and inert gas arc welding. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*, **4**, 1 [in Russian].
8. Dolzhenkov, V.A., Stuchnikov, F.B. (2007) *Microsoft Office Excel 2007*. St.-Petersburg, BKhV-Petersburg [in Russian].

В. Г. Соловьев

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

ІНТЕРНЕТ-БАЗА ДАНИХ ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ

Виконано значний обсяг робіт по дуговому наплавленню самозахисним порошковим дротом на плоскій і циліндричній поверхнях виробів, відкритою дугою, під флюсом і в середовищі захисних газів, в широкому діапазоні напруг і струмів дуги, при різних діаметрах дроту і при різних швидкостях наплавлень з метою використання експериментального матеріалу для розробки алгоритмів автоматизації технологічного процесу. У статті наводяться рішення по систематизації отриманих в результаті експериментів даних, яке дозволило всім учасникам досліджень мати віддалений доступ до інтернет-бази даних для її розширення, коригування та аналізу. Бібліогр. 8, рис. 3.

Ключові слова: автоматизація, база даних, дугова наплавка, порошковий дріт

V.G. Soloviyev

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

INTERNET DATABASE OF ARC SURFACING PROCESS USING FLUX-CORED WIRES

A significant volume of works was done on arc surfacing using self-shielding flux-cored wire on plane and cylindrical surfaces of workpieces with an open arc, under flux and in protective gas environment, in a wide range of stresses and arc currents, with different diameters of wire and at different deposition rates in order to use the experimental material to develop algorithms for automation of technological process. The article provides a solution on systematization of the data, obtained as a result of experiments, which allowed all the participants of investigations to have a remote access to the Internet database for its broadening, correction and analysis. 8 Ref., 3 Fig.

Keywords: automation, database, arc surfacing, flux-cored wire

Поступила в редакцию 21.11.2017

КОНФЕРЕНЦИЯ ОБЩЕСТВА СВАРЩИКОВ УКРАИНЫ

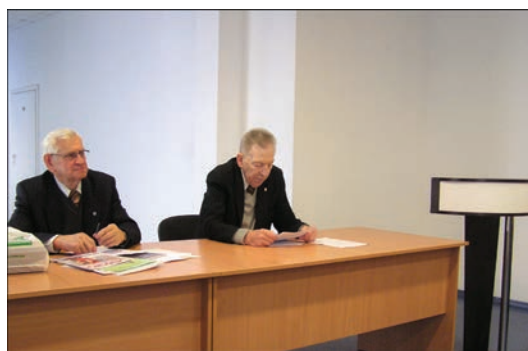
22 ноября 2017 г. в Киеве в рамках Промышленного форума (21–24 ноября) состоялась научно-практическая конференция «Современные проблемы сварочного производства», организованная Обществом сварщиков Украины (ОСУ) и посвященная 25-летию Общества. В ней приняли участие руководители, главные сварщики предприятий, специалисты коммерческих предприятий, предприниматели, преподаватели учебных заведений, всего свыше 60 человек.

Конференцию открыл президент ОСУ, канд. техн. наук *В. Г. Фартушный*. Он отметил, что в текущем году Обществу исполнилось 25 лет. В этом же году также отмечается 175-летний юбилей со дня рождения родоначальника электродуговой сварки — Н. Н. Бенардоса.

В. Г. Фартушный остановился в своем выступлении на цели создания в 1992 г. Общества сварщиков, его структуре. Сегодня ОСУ включает 10 областных подразделений и 7 региональных представительств. Его работой руководит Совет ОСУ, состоящий из 23 человек. Совет работает в тесной связи со специалистами ИЭС им. Е. О. Патона. К основному направлению работы Общества следует отнести информационную и консультационную деятельность, включающую организацию проведения семинаров, конференций, совещаний специалистов сварочного производства. За прошедший период рассматривались ряд важнейших проблем, направленных, в частности, на повышение качества выпускаемой продукции, подготовку кадров, аттестацию производств. Семинары проводились на крупных предприятиях. Ряд семинаров носили отраслевой характер, на которых рассматривали вопросы повышения квалификации специалистов судостроительных и ремонтных заводов, железной дороги, предприятий нефтехимии и других. В 2013 г. совещание главных сварщиков прошло в компании Бинцель Украина. Характерно, что семинары или совещания часто сопровождались демонстрацией нового оборудования, инновационных технологий, что делало их особенно полезными.

ОСУ регулярно участвует в специализированных сварочных выставках Украины с 1996 г. С 1997 г. специалисты ОСУ регулярно принимают участие в крупнейшей сварочной выставке в мире «Сварка и резка», которая традиционно проводится в г. Эссене (в 2017 г. в г. Дюссельдорфе), Германия. Совместно с Украинским аттестационным комитетом сварщиков Общество сварщиков проводило совещания по совершенствованию качества подготовки специалистов.

В. Г. Фартушный отметил активную роль Одесского отделения ОСУ в организации конкурсов рабочих-сварщиков. С 2011 г. украинские сварщи-



В президиуме конференции: В. Г. Фартушный и В. М. Илюшенко (справа налево)

ки довольно успешно принимают участие в международных конкурсах.

В части международных контактов были заключены договора о сотрудничестве с РНТСО, болгарским и китайским обществом сварщиков, ассоциацией «Электрод». В договорах предусматривается участие специалистов в совместных конференциях. В планах заключение соглашения с Европейской сварочной федерацией.

Затем на конференции были заслушаны ряд докладов. Д-р ист. наук *А. Н. Корниенко* (ИЭС) рассказал о выдающемся изобретателе Н. Н. Бенардосе и его вкладе в создание способа электродуговой сварки.

В. Н. Ткаченко (директор музея Н. Н. Бенардоса в г. Переяславе-Хмельницком, Киевская обл.) остановился на финансовых трудностях обеспечения функционирования музея, необходимости пополнения музея современными экспонатами.

Ю. В. Бутенко (главный сварщик ГП «Зоря» — «Машпроект», г. Николаев) рассказал о состоянии и проблемах обеспечения производства качественными материалами специального назначения.

Н. В. Высоколян (главный сварщик Крюковско-го вагоностроительного завода) охарактеризовал кратко 148-летний путь завода, трудности сегодняшнего дня, практически полное отсутствие госзаказов, сокращение специалистов. Сегодня как никогда важны шаги по универсализации производства,



В зале конференции

повышению квалификации рабочих, регулярной переподготовке кадров. В новых условиях важна роль координатора сварочных работ, требуется замена системы подготовки производства, ее надо начинать с конструкторов и завершать на уровне формирования технологических карт.

М. А. Лактионов (нач. управления сварки Сумского машиностроительного объединения) рассказал о сложном положении объединения, значительном сокращении численности из-за резкого сокращения заказов. Так, число сварщиков сократилось с 1200 до примерно 250 человек. Он также поделился опытом аттестации сварочных технологий на предприятии.

П. П. Проценко (директор Межотраслевого учебно-аттестационного центра (МУАЦ) — сделал акцент на том, что квалификация сотрудников — главный момент в обеспечении качества продукции. Требования к качеству сварки изложены в ДСТУ 190-3834. Сегодня более 60 стран используют в своей работе квалификационную систему Международного института сварки.

Н. А. Проценко (ИЭС им. Е. О. Патона) остановилась на теме отмены с 01.01.2018 г. всех ГОСТ, принятых до 1992 г. и перечне гармонизированных стандартов в Украине. В январе 2018 г. в МУАЦ состоится учебный семинар по особенностям перехода на ДСТУ.

В. А. Бондаренко (директор по маркетингу компании Фрониус Украина) посвятил свое выступление вкладу компании в 4-ю промышленную революцию. Она подразумевает развитие роботизированных и автоматизированных процессов сварки, создание технологий, реализуемых без участия человека, осуществление тесной взаимосвязи в системе «техника–человек». Подразумевается передача данных от человека к оборудованию через интернет, получению распечатанного отчета с полной информацией о выполнении каждого шва, вплоть до себестоимости выполненных работ.

С. В. Грущенко (ПлазмаТек) рассказал о реализуемых в компании мероприятиях по обеспечению высокого качества выпускаемых сварочных материалов (электродов, проволок и прутков). Они включают использование качественного сырья, современного технологического оборудования, строгое соблюдение технологических инструкций. Проводятся работы по освоению собственного производства ряда компонентов, модернизации парка технологического оборудования, уделяется внимание усовершенствованию упаковки материалов. Относительно проволоки — проведены исследования по плазменной очистке ее поверхности и вакуумной термообработке, разработке реактивов для очистки проволоки перед омеднением; получены положи-

тельные результаты по получению полированной поверхности проволоки. Налаживается кооперация с компаниями США и Великобритании для совместных поставок материалов заказчикам.

В. Н. Упырь (главный технолог ТМ. ВЕЛТЕК) коротко осветил номенклатуру выпускаемых на предприятии наплавочных порошковых проволок. Производство включает 120 марок проволок диаметром от 1 до 6 мм для применения в горнорудной промышленности, металлургии, железной дороге и других отраслях.

А. Н. Алимов (технический директор компании Витаполис) рассказал о производстве в Украине сварочной проволоки из высоколегированных сталей. Основа производства — проволоки 0,8...1,6 мм для процессов МИГ/МАГ сварки. Выпускаются также проволоки диаметром 2...4 мм для дуговой сварки под флюсом и прутки (с маркировкой) для ТИГ сварки. Докладчик презентовал участникам каталог материалов компании и отметил, что сегодня в Украине три компании — ПлазмаТек, Сумы-Электрод и Витаполис — выпускают высококачественную продукцию, вполне конкурентоспособную на мировом рынке.

П. Н. Погребной (директор предприятия Сумы-Электрод) отметил, что электроды предприятия применяются для производства ответственных конструкций, успешно конкурируют с материалами ведущих компаний мира, 175 марок из них сертифицированы. Крупные партии материалов уже поставлены в США и Канаду.

Дидус Ю. А. (директор фирмы Бинцель Украина) рассказал о предложениях компании в направлении повышения эффективности и экологичности производства, системе экологии защитного газа EWR.

Крылов С. В. (директор НТЦ Промавтосварка) посвятил свое выступление разработанному в центре оборудованию для электродуговой металлизации.

Король Н. А. (директор НПФ Сварконтакт) рассказал о разработке и производстве на предприятии источников питания инверторного типа.

В. С. Сидорук (ст. науч. сотр. ИЭС им. Е. О. Патона) в связи со 110-летним юбилеем со дня рождения рассказал о крупном ученом, заложившем металлургические основы сварки, открывшем явление саморегулирования дуги В. И. Дятлове.

К. В. Красносельский (директор компании Триада Сварка) поделился впечатлениями о посещении агропромышленной выставки в Ганновере и призвал Общество сварщиков Украины возглавить в стране движение сварочного производства в направлении «Промышленность 4.0».

В заключение конференции В. Г. Фартушный поблагодарил выступающих за интересные сообщения, присутствующих — за активное участие в работе и затем вручил Почетные грамоты Общества наиболее активным ее членам.

Подготовили: В. Н. Липодаев, А. Т. Зельниченко

К 90-летию академика Б. А. Мовчана



9 января 2018 г. исполнилось 90 лет выдающемуся ученому-материаловеду, основателю научной школы получения новых материалов с помощью электронно-лучевой технологии испарения и конденсации в вакууме (ЕВ-PVD), академику Национальной академии наук Украины, заслуженному деятелю науки и техники Украины, Борису Алексеевичу Мовчану.

После окончания Киевского государственного университета им. Т. Г. Шевченко по специальности физика металлов в 1951 г. и по настоящее время жизнь Б. А. Мовчана неразрывно связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона. Начав свою трудовую деятельность научным сотрудником, в 1954 г. Б. А. Мовчан защищает кандидатскую диссертацию, а в 1961 г. — докторскую. В период 1960-2003 гг. Б. А. Мовчан являлся руководителем научного отдела электронно-лучевых технологий ИЭС им. Е. О. Патона. В июне 1964 г. его избрали чл.-корреспондентом Академии наук УССР, а в марте 1978 г. — академиком.

Б. А. Мовчан получил отечественное и международное признание и известность как в области исследования взаимосвязи структуры и свойств неорганических материалов (аморфных, нанокристаллических, дисперсно-упрочненных, микрослойных, микропористых) и защитных покрытий, осаждаемых из паровой фазы в вакууме, так и в реализации разработанных технологических процессов и новых образцов электронно-лучевого оборудования.

Б. А. Мовчан является автором более 380 научных публикаций, 7 монографий, более 120 патентов. Он подготовил 68 кандидатов и докторов технических наук, является членом редколлегий нескольких научных журналов.

По инициативе Б. А. Мовчана и его активном участии были созданы такие совместные предприятия, как украинско-голландское «Интертурбина-Па-

тон» (1992 г.) и украинско-американское «Пратт энд Уитни-Патон» (1993 г.). В 1994 г. им было создано государственное предприятие «Международный центр электронно-лучевых технологий ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» (МЦ ЭЛТ), которое продолжает работы по разработке новых электронно-лучевых технологий и оборудования как для зарубежных заказчиков из США, КНР, Канады, Англии, так и для украинских заказчиков, среди которых НПО «Зоря»—«Машпроект» (г. Николаев) и ЗМКБ «Прогресс» (г. Запорожье).

Наряду с созданием новых технологий Б. А. Мовчан разрабатывает и соответствующее электронно-лучевое оборудование для получения новых материалов и нанесения защитных покрытий. Под его руководством были спроектированы и изготовлены 96 электронно-лучевых установок различного назначения.

Трудовая и научная деятельность Б. А. Мовчана была отмечена рядом высоких правительственных наград, среди которых — Государственная премия УССР в области науки и техники, два ордена Трудового Красного знамени, Ленинская премия за работы в области электронно-лучевых технологий, орден Ленина, премия Е. О. Патона НАН Украины. За личный весомый вклад в развитие отечественной науки, упрочнения научно-технического потенциала Украины Б. А. Мовчан награжден орденом «За заслуги» III степени, орденом Ярослава Мудрого V степени, ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники».

Б. А. Мовчан отмечен также зарубежными почетными дипломами и премиями. В Китае ему вручен Почетный диплом Министерства авиационной промышленности КНР и присвоено почетное звание профессора Пекинского университета аэронавтики и космонавтики. В США получены два диплома Американского вакуумного общества. В 2016 г. Б. А. Мовчану в США была вручена премия им. Р. Ф. Банши «За новаторские работы в области электронно-лучевого испарения и деятельность руководителя и наставника на трех континентах на протяжении 60 лет».

Свое 90-летие академик Б. А. Мовчан встретил на своем рабочем месте научного консультанта МЦ ЭЛТ, продолжая исследования по созданию новых металлоорганических твердо- и жидкофазных композиций с наночастицами, осаждаемыми методом ЕВ-PVD, с целью их последующего применения для медицины и фармацевтики.

От всей души поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья и дальнейших успехов на благо Украины.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Международный центр электронно-лучевых технологий
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

Календарь января

1 января 1932

Родился Анатолий Яковлевич Ищенко — известный ученый, чл.-корр. НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины. Он внес значительный вклад в основы теории сварки алюминиевых и магниевых сплавов в вопросах образования оксидных пленок, кристаллизационных трещин при сварке, взаимодействия компонентов сплавов с плазмой дуги, электронным и лазерным пучками.

2 января 2009

Умер крупный ученый в области сварки и материаловедения, академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины Даниил Андреевич Дудко (1921–2009). Работал в Институте электросварки, внес значительный вклад в исследование и разработку процессов сварки под флюсом и в среде углекислого газа, электрошлаковой сварки, металлургии, разработку плазменно-дугового и микроплазменного способов сварки, новых технологий напыления. Многие разработки при активном участии Д. А. Дудко внедрены в ракетостроении, электронике, энергетике. Автор более 900 научных работ.

3 января 1927

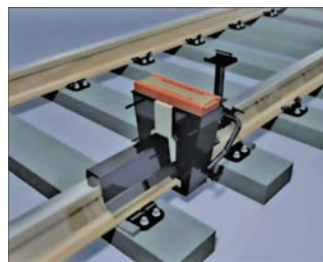
Опубликован один из патентов американской компании «Harnischfeger Corporation», касающийся модернизации экскаватора. Применяя современные технологии и сварку, эта компания впервые в мире реализовала проект первого цельносварного экскаватора в 1935 г. Годом позже эта компания представила первый в мире цельносварной подъемный кран со стрелой коробчатого сечения.

**4 января 2004**

Начато строительство ракетного катера проекта 022 (класса Хубэй), одного из серии 83 китайских катамаранов. Это первый в мире катамаран с ударным ракетным вооружением. Выполнен по технологии стелс. Примечательно, что для создания ракетных установок применялась сварка трением с перемешиванием.

**5 января 1935**

Вильгельм Алерт запатентовал усовершенствованный способ термитной сварки для железнодорожных путей. В своем приспособлении он применил более высокую температуру, создав специальную конструкцию, которая отделяла зону сварки с высокой температурой от основного металла. Алерт значительно упростил систему соединения, а также использовал предварительный подогрев свариваемых кромок.

**6 января 1933**

Родился Давид Михайлович Калеко. Им разработаны научные основы технологии сварки черных и цветных металлов малого сечения дугой, горячей при разряде конденсаторов, и средств управления этим процессом. Участвовал в создании установки для точечной сварки алюминиевых сплавов, автоматов для ударной конденсаторной сварки деталей электронной техники и радиопромышленности. Д. М. Калеко разработаны также медицинские имплантаты и инструменты из металла с эффектом памяти формы. Автор более 172 научных работ, в том числе трех монографий.

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

7 января 1935

В этот день родился Валерий Николаевич Кубасов (1935–2014) — советский космонавт. На космическом корабле «Союз–6» летчиками-космонавтами Г. С. Шониным и В. Н. Кубасовым 16 октября 1969 г. впервые в мире была осуществлена сварка в космосе. После разгерметизации бытового отсека космонавт-оператор В. Н. Кубасов, находившийся в спускаемом аппарате, в автоматическом режиме провел эксперименты по плазменной, электронно-лучевой и дуговой сварке плавящимся электродом.

8 января 1910

Начало применения ацетиленовой сварки при строительстве трубопроводов для водоснабжения, а именно при освоении природного источника воды на территории США. Возведением трехкилометрового трубопровода занималась фирма «Central Colorado Power Co.». Трубопровод состоял из 200 сегментов различного диаметра. На работу ушло более года и было затрачено значительное количество карбида и кислорода.

**9 января 1928**

Родился Борис Алексеевич Мовчан — выдающийся ученый в области материаловедения металлических и органических материалов (аморфных, нанокристаллических, дисперсноупрочненных, слоистых и пористых) и защитных покрытий, а также разработки и реализации электронно-лучевых технологий, создания новых функциональных материалов. Б. А. Мовчан — академик НАН Украины, автор около 360 научных работ и более 100 патентов на изобретения.

10 января 1972

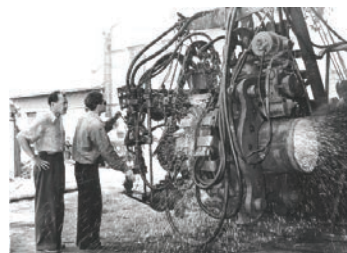
Выведен из состава флота США корабль «Саванна» — экспериментальное гражданское судно с ядерной силовой установкой. Он был создан для демонстрации возможности мирного применения ядерной энергии. Построен в конце 1950-х годов в США с использованием технологии дуговой сварки покрытыми электродами. Процесс изготовления детально контролировался с использованием рентгеновской установки. Судно эксплуатировалось с 1962 по 1972 гг. Оно одно из четырех когда-либо построенных торговых судов с ядерной энергетической установкой. В 1981 г. «Саванна» была передана в экспозицию «Patriots Point Naval and Maritime Museum» города Монте Плезант, Южная Каролина, США.

**11 января 1805**

Скончался Фонтана Феличе (1730–1805) — итальянский химик и натуралист. Открыл водяной (коксовый) горючий газ, получающийся при орошении водой раскаленного угля и состоящий из водорода и оксида углерода. Спустя полстолетия этот газ начали активно использовать для нагрева свариваемых деталей. В 1930–1940-х гг. кузнечная горновая сварка и «сварка водяным газом» отмечались как отдельные разновидности производственного процесса. В те же годы подтвердилось, что последним из этих способов можно сваривать листы толщиной от 4 до 80 мм при помощи молота или рольгангов.

12 января 1951

Ученые Института электросварки (М. М. Остапенко, В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. А. Сахарнов) впервые в мире разработали способ стыковой контактной сварки оплавлением с использованием кольцевых трансформаторов применительно к соединению рельсов, труб и других изделий. Стыковые машины с кольцевыми трансформаторами имеют в 10-20 раз меньше сопротивление короткого замыкания по сравнению со стандартными.



13 января 1975

Начало проведения советско-французского научного эксперимента ARAKS, направленного на изучение ионосферы и магнитного поля Земли. Технология эксперимента имеет много общего с технологией электронно-лучевой сварки, так как в ней также используется кинетическая энергия электронов в электронном пучке. Эксперимент является одним из всемирно известных достижений Института электросварки.



14 января 1943

Выдан патент на технологию сварки вольфрамовым электродом в среде гелия сотрудникам компании «Нортрон эйркрафт» Т. Р. Пайперу, В. Х. Павлеку и Р. Мередиту. Ранее, в конце 1941 г., Р. Мередит разработал технологию сварки ТИГ в среде аргона на постоянном токе обратной полярности, а затем и на переменном токе от трансформатора промышленной частоты с высокочастотной приставкой.



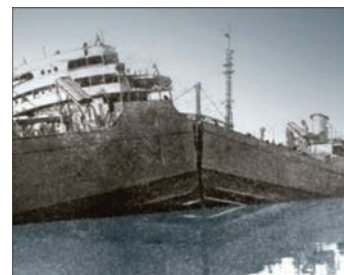
15 января 1958

Была заказана атомная подводная лодка ВМС США Thresher (SSN-593), которая впоследствии затонула вместе со всем экипажем в Атлантическом океане. «Трешер» в сопровождении спасательного судна ASR-20 Skylark вышла в море для проведения глубоководных погружений. Целью погружений являлась проверка прочности корпуса на предельных для лодки глубинах (360 м). Из-за трещины в сварном шве трубопровода забортной воды машинный отсек субмарины начал заполняться водой. После гибели этой подлодки расследование выявило многочисленные случаи нарушения технологии, использование некондиционных материалов, плохой контроль качества сварных швов.



16 января 1943

После года успешных морских испытаний при возвращении на базу разломился пополам танкер «Скенектади». Трещина появилась в остром углу люка на палубе, мгновенно прошла через палубу и по обоим бортам до киля. Сообщение гласило: «На тихой воде у стенки судостроительного завода переломился танкер «Скенектади» водоизмещением 7230 т». Несмотря на войну, это событие получило широкую огласку в научной прессе и послужило в свою очередь стимулом для развития научных исследований в области сварки.



17 января 1781

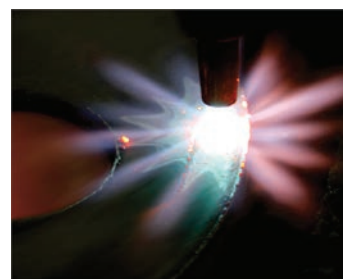
Родился Роберт Хэйр (1781–1858) — американский химик. Он разработал конструкцию кислородно-водородной горелки. Параллельно с поиском состава газов для сварки велась работа по созданию надежного оборудования. В первую очередь необходимо было сконструировать горелку, которая обеспечивала бы хорошее смешивание газов с кислородом, высокую концентрацию теплоты на выходе из сопла и взрывобезопасность. Одним из первых заслуживающих внимания устройств была горелка Хэйра, предложенная в 1802 г.

18 января 1861

Родился Иоганн Вильгельм Гольдшмидт (1861–1923) — известный немецкий химик. Он вошел в историю как изобретатель способа термитной сварки. Процесс, протекающий при этом способе, иногда называют «Гольдшмидта реакцией» или «Гольдшмидта процесс». В 1898 г. Иоганн Гольдшмидт впервые осуществил термитную сварку двух железных брусьев, предварительно заформовав их и заполнив место стыка термитной смесью. После сгорания смеси образовавшаяся жидкая ванна была настолько перегрета, что подплавила кромки, а после застывания превратилась в шов. Шлак всплыл и легко отделился от места соединения.

19 января 1833

Родился Генри Уайлд — британский ученый-инженер. В 1860-х годах Генри Уайлд, применяя теории Вольты и Деви и используя примитивные электрические источники тока того времени, электрической дугой косвенного действия сварил торцы проводов относительно большого диаметра. Генри Уайлд получил патент на свое изобретение, который в настоящее время признается в качестве «патента электросварки».

**20 января 1925**

Фирма «А.О.Смит» зарегистрировала один из своих патентов на сварку труб. Компания разработала метод контактной сварки оплавлением и начала практическое использование технологии в производстве прямошовных труб с толщиной стенки 5 мм и диаметром 500 мм, которые сваривались по всей длине (12 м) на машинах мощностью 5000 кВА. В 1920-е годы инженеры компании разработали покрытие для сварочного стержня, который они использовали в производстве до 1965 г., а также первую дуговую сварку труб высокого давления.

**21 января 1942**

Изготовлен первый танк Т-34, корпус которого был впервые выполнен с применением автоматической сварки. Технология сварки была разработана специалистами Института электросварки. Производительность автоматической сварки оказалась в 10 раз выше, чем ручной.



22 января 1971



Тамара Марковна Слуцкая (Институт электросварки) разработала самозащитные активированные электродные проволоки для дуговой сварки. Введение в состав проволоки небольших количеств (5-7 мас. %) солей щелочных и щелочноземельных металлов повышает устойчивость горения дуги при сварке в углекислом газе или его смесях.

23 января 1975



Борису Сергеевичу Касаткину — крупному ученому в области металловедения сварки, член-кор. НАН Украины присуждена Премия им. Е. О. Патона НАН Украины за цикл работ «Термоупрочненные низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций». При его личном участии разработано и освоено производство высокопрочных сталей, которые нашли успешное применение при изготовлении экскаваторов, автодорожных мостов, шахтных скипов, креплений, гидросооружений и других ответственных конструкций. Автор более 300 научных работ, в том числе восьми монографий.

24 января 1927



Родился Игорь Константинович Походня — крупный ученый в области сварки, академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники. Он внес значительный вклад в теорию сварочных процессов (плавление и перенос электродного металла, абсорбция и десорбция газов расплавленным металлом, влияние типа электродных покрытий на плавление и перенос металла при сварке). Участвовал в создании многих марок низкотоксичных и высокопроизводительных электродов и порошковых проволок. Организовал массовое производство низкотоксичных сварочных материалов на ряде предприятий СССР. Автор более 900 научных работ, в том числе 28 монографий.

25 января 2004

На Марсе приземлился марсоход «Opportunity», доставленный ракетой-носителем «Дельта II». Эта модель ракеты была первой, при производстве которой применили сварку трением с перемешиванием. Экспериментальным использованием нового вида соединения занялась компания-пионер «Боинг». Благодаря надежности этого способа он получил распространение в ракетостроении.



26 января 1946



Константину Константиновичу Хренову — крупному ученому в области сварки, академику НАН Украины, заслуженному деятелю науки и техники присуждена Государственная премия СССР «За разработку и внедрение методов электросварки и резки под водой». В годы Второй мировой войны лабораторией сварки под руководством К. К. Хренова совместно со специализированными бригадами выполнен большой объем работ по ремонту под водой судов, разрушенных мостов и портовых сооружений. Автор более 200 научных трудов.

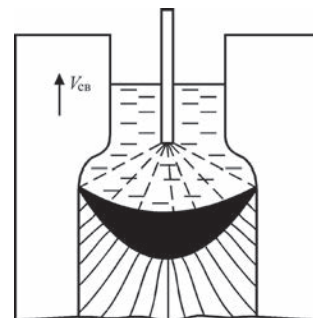
27 января 1983

Закончена проходка самого протяженного подводного тоннеля Сэйкан, соединяющего японские острова Хонсю и Хоккайдо. Окончательная длина этого железнодорожного тоннеля составила 53,9 км, в том числе подводная часть — 23,3 км. Тоннель опускается на 100 м ниже уровня морского дна. Рельсы не имеют болтовых соединений стыков, они сварены в единую 54-километровую плетть. По-видимому, это самое длинное сварное железнодорожное полотно в мире.



28 января 1951

Б. Е. Патном и Г. З. Волошкевичем (Институт электросварки) впервые создан принципиально новый процесс — электрошлаковая сварка металлов. Он предназначен для соединения изделий практически неограниченной толщины за один проход. ЭШС получила широкое распространение в СССР и за рубежом, коренным образом изменив технологию изготовления толстостенных металлических конструкций.



29 января 1907



Шведский инженер Оскар Кельберг изобрел сварочные электроды с покрытием и получил патент на это изобретение. Его внимание привлекло наблюдение сварщиков, которые отметили, что свойство шва улучшается в тех случаях, когда электроды или зоны, подлежащие сварке, «испачканы» гашеной известью, засорявшей сварочные площадки после получения ацетилена из карбида кальция. Тот же эффект возникал и от загрязнения, оставшегося на поверхности проволоки после ее волочения, которое проводили с применением извести.

30 января 1991



Умер Джон Бардин (1908–1991) — американский физик. По окончании Второй мировой войны Джон Бардин перешел в компанию «Белл», где, работая совместно с Уильямом Шокли и Уолтером Браттейном, участвовал в создании полупроводниковых приборов, которые могли как выпрямлять, так и усиливать электрические сигналы. Бардин разделил в 1956 г. Нобелевскую премию с Шокли и Браттейном «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». Транзистор является одной из самых главных деталей сварочного инвертора.

31 января 1964



Известный ученый в области мостостроения, член-корр. НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины Владимир Иванович Труфьяков (Институт электросварки) — предложил и экспериментально обосновал использование локального взрыва как метода упрочняющей обработки соединений крупногабаритных конструкций. Им также существенно развиты представления о влиянии на сопротивление усталости металла концентрации напряжений, сварочных остаточных напряжений, дефектов сварки, частоты и формы нагрузки. Автор более 240 научных трудов, в том числе трех монографий.

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

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

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



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

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	5400 руб.	10800 руб.	174 дол. США	348 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов
на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.
В 2018 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2016 гг. в формате *.pdf.

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

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

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

Стоимость рекламы

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

Подписано к печати 28.12.2017. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,64. Уч.-изд. л. 10,00.
Печать ООО «ДИА».

© Автоматическая сварка, 2018

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