



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,
В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
В. И. Лысак (Россия)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Г. А. Туричин (Россия)
Чжан Янмин (Китай)
Д. фон Хофе (Германия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина
Электронная верстка:
А. И. Сулима, И. Р. Наумова,
И. В. Петушков

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечни
утвержденных ВАК Украины
и Российской Федерации изданий
для публикации трудов
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

75 лет Институту электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины	3
--	---

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<i>Покляцкий А. Г., Чайка А. А., Ключков И. Н., Яворская М. Р.</i> Прочность и структура сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных трением с перемешиванием и свар- кой неплавящимся электродом	11
<i>Ланкин Ю. Н., Бондарев А. А., Довгодько Е. И., Дьяченко В. А.</i> Система управления разверткой пучка при электрон- но-лучевой сварке	16
<i>Москович Г. Н.</i> Особенности расчета инверторов тока	21

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

<i>Назаренко О. К.</i> 50 лет электронно-лучевой сварке в ИЭС им. Е. О. Патона	29
<i>Бут В. С., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И.</i> Осо- бенности применения разрезных тройников при ремонте и реконструкции магистральных трубопроводов в усло- виях эксплуатации	32
<i>Чинахов Д. А.</i> Влияние двухструйной газовой защиты на эксплуатационные свойства сварных соединений судостроительной стали GL-E36	39
<i>Сторчай Е. И., Горбатский Ю. В., Лантушенко Л. С.</i> Некоторые аспекты технологии высокотемпературной бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов	43
ИЗ ИСТОРИИ СВАРКИ <i>Литвинов А. П., Дерломенко В. В.</i> Свариваемость и работоспособность сварных соединений	50

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Жудра А. П., Ворончук А. П., Фомакин А. А., Великий С. И.</i> Новое оборудование для наплавки конусов и чаш засып- ных аппаратов	57
---	----

ХРОНИКА

К 25-летию сварки в открытом космосе	60
Открытие Российско-Германского центра лазерных технологий	62
Наши поздравления!	49, 65
ИНФОРМАЦИЯ	66

Avtomaticheskaya Svarka

№ 9 (677)
September 2009
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,
A. T. Zelnichenko,
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),
V. I. Kiryan, Yu. N. Lankin,
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
V. I. Makhnenko,
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
V. I. Lysak (Russia)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
G. A. Turichin (Russia)
Zhang Yanmin (China)

FOUNDERS:

The National Academy of Sciences
of Ukraine, The E. O. Paton Electric
Welding Institute,
International Association «Welding»

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23

Fax: (38044) 528 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua

http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina

Electron galley:

A. I. Sulima,

I. R. Naumova,

I. V. Petushkov

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

This publication and each of the articles
contained here in are protected
by copyright

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

CONTENTS

75 years of the E. O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Poklyatskiy A. G., Chaika A. A., Klochkov I. N., Yavorskaya
M. R.* Strength and structure of aluminium alloy welded
joints produced by friction stir welding and non-consumable
electrode welding 11

*Lankin Yu. N., Bondarev A. A., Dovgadko E. I., Djachenko
V. A.* System of control of beam scanning in electron beam
welding 16

Moskovich G. N. Peculiarities of design of current inverters 21

INDUSTRIAL

Nazarenko O. K. 50 years of electron beam welding at the
E. O. Paton Electric Welding Institute 29

Boot V. S., Velikoivanenko E. A., Oleinik O. I. Peculiarities
of application of split T-joints in repair and reconstruction
of main pipelines under service conditions 32

Chinakhov D. A. Effect of two-jet gas shielding on service prop-
erties of welded joints of ship steel GL-E36 39

Storchaj E. I., Gorbatsky Yu. V., Lantushenko L. S. Some as-
pects of technology of high-temperature flux-free brazing of
aluminium alloys 43

FROM HISTORY OF WELDING

Litvinov A. P., Derlomenko V. V. Weldability and performance
of welded joints 50

BRIEF INFORMATION

Zhudra A. P., Voronchuk A. P., Fomakin A. A., Velikiy S. I.
New equipment for hardfacing of cones and bells of charging
devices 57

NEWS

Towards the 25th anniversary of welding in open space 60

Opening of Russian-German Center of Laser Technologies 62

Our congratulations! 49, 65

INFORMATION 66

*Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title «The Paton Welding Journal»
Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board.*

75 ЛЕТ ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ



Академик Е. О. Патон

Бурное развитие экономики Российской империи в конце XIX ст. потребовало высококвалифицированных инженерных кадров. Для подготовки таких специалистов в 1898 г. в Киеве был создан политехнический институт (КПИ). Первый ректор КПИ профессор В. Л. Кирпичов во вновь созданный институт в качестве преподавателей приглашал молодых ученых, в числе которых был и Евгений Оскарович Патон — тогда уже известный ученый в области мостостроения. За годы работы в Киеве Евгений Оскарович спроектировал и построил множество оригинальных мостов и других строительных конструкций, подготовил ряд фундаментальных трудов по мостостроению. В 1904 г. он возглавил кафедру мостов в КПИ.

В 1929 г. Евгений Оскарович Патон избран действительным членом (академиком) Всеукраинской академии наук, что содействовало ускоренному развитию в Украине строительной механики, металлургии, материаловедения, электросварки. Были созданы новые академические институты, которые начали активно заниматься исследованиями и разработками в области технических наук.

На кафедре инженерных сооружений КПИ по инициативе Е. О. Патона была создана лаборатория сварки для проведения комплексных исследований сварных конструкций, изучения металлургических процессов и металловедения сварки, физики дугового разряда с последующей разработкой аппаратуры, материалов и технологий сварки. Для решения этих задач в 1934 г. создан Институт электросварки, а Е. О. Патон утвержден директором института. С первых лет существования института механизация и автоматизация сварки считались одними из важнейших его задач.

В 1939–1940 гг. под руководством Е. О. Патона разработаны способ автоматической сварки

под флюсом и уникальная технология автоматической сварки броневых корпусов танков, авиабомб, артиллерийских систем. Во время Великой Отечественной войны коллектив института продолжал научные исследования в заводских условиях. В 1942 г. В. И. Дятлов открыл явление саморегулирования плавления электрода при сварке под флюсом. Исследования этого явления, выполненные

Б. Е. Патонем совместно с А. М. Макарой, П. И. Севбо и М. Н. Сидоренко, использованы при создании простого и надежного сварочного аппарата.

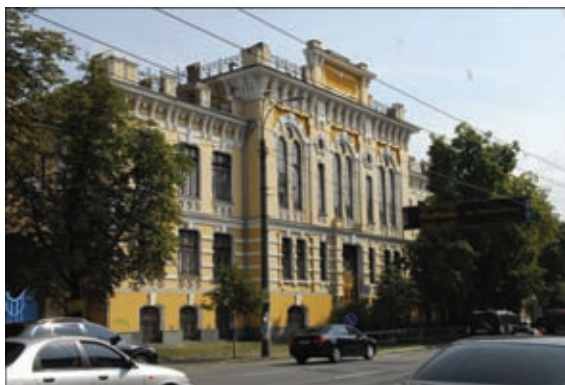
Автоматизация процесса сварки позволила в короткое время нарастить объемы выпуска танков и резко повысить качество сварных соединений. Танк Т-34, который изготовляли на Уралвагонзаводе в Нижнем Тагиле и других заводах страны, признан специалистами лучшим средним танком второй мировой войны. Благодаря его надежной сварной броне были спасены жизни многих тысяч танкистов. За заслуги в деле повышения обороноспособности нашей страны в 1943 г. Е. О. Патон был удостоен звания Героя Социалистического Труда СССР. В 1945 г. Институту электросварки присвоено имя Евгения Оскаровича Патона.

В послевоенные годы в институте выполнены исследования процессов нагрева и плавления электрода, образования электродных капель, изучены проблемы стойкости горения дуги, ее саморегулирования при сварке плавящимся электродом. Исследованы статические свойства автоматов для сварки под флюсом и предложена методика анализа работы автоматов по статическим вольт-амперным характеристикам (Б. Е. Патон).

Изучены особенности электрических, тепловых и металлургических процессов сварки под флюсом, способы регулирования химического состава и механических свойств металла швов и сварных соединений, созданы технологии сварки под флюсом



Академик Б. Е. Патон



ИЭС им. Е. О. Патона (корпус № 1)

сталей различного класса (Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, А. М. Макара, Д. М. Рабкин).

К тому времени автоматическая сварка под флюсом стала одним из самых высокопроизводительных процессов, однако промышленность требовала новых разработок в этой отрасли. Е. О. Патон инициировал углубленные исследования металлургических процессов сварки под флюсом. За короткий срок были созданы основы теории металлургии сварки и наплавки под флюсом (И. И. Фрумин, Д. М. Рабкин, В. В. Подгаецкий, И. К. Походня), а также мощное производство плавящихся флюсов (В. В. Подгаецкий, Е. И. Лейначук, В. И. Галинич).

В институте разработаны технология сварки на повышенных скоростях и сварочные флюсы, высокопроизводительное сварочное оборудование. На основе этих разработок на Харцызском трубном заводе впервые в стране развернуло производство высококачественных труб большого диаметра (Б. Е. Патон, Р. И. Лашкевич, Б. И. Медовар, С. Л. Мандельберг, А. А. Рыбаков). Это стало основой для становления и развития современного массового производства труб большого диаметра на Харцызском, Челябинском, Волжском, Выксунском и других заводах страны для мощных газотранспортных систем СССР, а теперь стран СНГ.

Сварка под флюсом с принудительным формированием шва была применена при строительстве цельносварного моста через Днепр в Киеве, названного именем Е. О. Патона — главного идеолога сварного мостостроения, технического руководителя проектирования и строительства этого уникального сооружения. Позже в институте разработали способ дуговой сварки порошковой проволокой с принудительным формированием шва, который широко использовали при сооружении пролетных строений Московского и Южного мостов через Днепр в Киеве и моста через Волгу в Саратове, при сооружении магистральных трубопроводов, металлургических агрегатов, химических аппаратов, корпусов судов.

В 1950 г. Б. Е. Патон назначен на должность заместителя директора института по научной работе, а в 1953 г. после кончины Евгения Оскаровича Патона — директором ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР. По его инициативе были подготовлены, а затем приняты директивными органами программы развития фундаментальных исследований сварочных процессов, разработки оборудования, материалов, технологий, создания новых научно-исследовательских институтов и заводских лабораторий, строительства специализированных заводов по производству сварочного оборудования, материалов, сварных конструкций. Ход выполнения программ постоянно контролировали, вносили коррективы в планы работ с уче-

том прогнозно-аналитических и экономических исследований состояния сварочного производства в СССР и во всем мире (В. Н. Бернадский, П. Ф. Харченко, В. С. Куцак, А. А. Мазур, Ф. Х. Бийцев, С. Н. Аккуратнова, П. В. Игнатченко, Б. М. Ефетов, В. И. Снежко, Л. В. Катюха). Выполнение указанных программ определило развитие сварочной науки и техники во второй половине XX в. не только в СССР, но и в ряде зарубежных стран. СССР стал ведущим государством мира в области сварки, а наши американские коллеги назвали Киев столицей сварщиков мира.

Еще во второй половине 1940-х годов Е. О. Патон поставил перед коллективом института задачу создать способ механизированной сварки, пригодный для работы в монтажных условиях. В поисках такого способа Г. З. Волошкевичу удалось осуществить новый сварочный процесс — электрошлаковый. Б. Е. Патон предугадал большое будущее этого процесса. Он сосредоточил силы коллектива на решении наиболее важных проблем электрошлаковой сварки. В кратчайший срок был разработан способ сварки металла большой (до 4 м) толщины. Применение электрошлаковой сварки внесло коренные изменения в технологию производства таких изделий, как барабаны котлов высокого давления, станины тяжелых прессов и прокатных станов, колеса и валы гидротурбин и т. д. (Б. Е. Патон, Г. З. Волошкевич, А. М. Макара, Ю. А. Стеренбоген, И. И. Суцук-Слюсаренко, И. И. Лычко).

По прогнозным оценкам специалистов, в ближайшем будущем основой сварочного производства остается дуговая сварка во всевозможных ее разновидностях. На дальнейшем усовершенствовании и развитии этого процесса сосредоточены усилия научных сотрудников и инженеров института.

Разработан способ дуговой сварки в атмосфере углекислого газа. Благодаря его широкому внедрению значительно повысился уровень механизации сварочных работ (Д. А. Дудко, И. И. Заруба, А. Г. Потапьевский).

Выполнены исследования процессов плавления и переноса электродного металла, взаимодействия металла с газами и шлаками, установлены закономерности процессов абсорбции и десорбции газов. Создано новое поколение низкотоксичных сварочных электродов (И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. Е. Марченко) и налажено крупнейшее в мире производство электродов для ручной дуговой сварки. Коренным образом улучшились условия труда сварщиков, во много раз снизился уровень их профессиональных заболеваний. Широкомасштабному внедрению низкотоксичных электродов способствовала эффективная работа Опытного завода сварочных материалов института под руководством П. А. Косенко.

Результаты исследований металловедческих проблем дуговой сварки, механизмов образования горячих, холодных и индуцируемых водородом трещин, особенностей замедленного разрушения сварных соединений стали основой для создания материалов и технологий для сварки высокопрочных, теплостойких, жаропрочных, высоколегированных сталей и сплавов, материалов для криогенной техники (А. М. Макара, Б. И. Медовар, Б. С. Касаткин, А. Е. Аснис, Ю. М. Готальский, М. И. Каховский, В. Ф. Мусияченко, К. А. Ющенко, Л. И. Миходуй, В. И. Гордонный, В. Ф. Грабин, М. М. Савицкий, А. К. Царюк, В. Д. Позняков) и сплавов на основе алюминия и титана (Д. М. Рабкин, А. Я. Ищенко, С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Л. С. Киреев).

В институте развиваются исследования по инженерии поверхности. Созданы оборудование, технология и материалы для механизированной наплавки и напыления износостойких сплавов на поверхности рабочих органов машин и механизмов, которые используются в горно-металлургическом комплексе, строительстве, энергетике, машиностроении (И. И. Фрумин, И. К. Походня, Ю. А. Юзвенко, И. А. Рябцев, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко, А. П. Жудра, М. Л. Жадкевич).

Выполнены исследования особенностей сварки порошковой проволокой. Создан ряд само- и газозащитных порошковых проволок различного назначения, организовано их производство (И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков). В настоящее время это направление является одним из ведущих в мировой сварочной науке и технике.

Открылись новые возможности в освоении континентального шельфа, постройке и ремонте портовых сооружений, трубопроводных переходов через реки и других объектов (В. Е. Патон, И. М. Савич, С. Ю. Максимов).

Значительное внимание уделяется проблеме использования в сварке и других родственных технологических процессах явления сжатия дуги. Созданы новые технологические процессы микроплазменной сварки и резки сжатыми дугами (Д. А. Дудко, В. С. Гвоздецкий, В. Е. Патон, К. К. Хренов) и микросварка электронной аппаратуры (А. А. Росошинский).

Проведены фундаментальные исследования в области контактной стыковой сварки (В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко). Изучено влияние сопротивления короткого замыкания контактных машин на процесс сварки. Определено, что сопротивление существенно влияет на стабильность и энергетические показатели контактного нагрева металла. Установлены возможности радикального улучшения этих показателей за счет программного регулирования основных параметров процесса плавления с использованием обратных связей по току и напряжению, найдены алгоритмы регули-

рования этих параметров. На базе проведенных исследований созданы первые в мировой практике системы многофакторного управления процессом контактной сварки оплавлением. Разработана сварка непрерывным оплавлением, которая отличается от существующих технологий меньшим расходом энергии и большей производительностью. Это дало возможность надежно соединять детали, имеющие большую площадь поперечного пересечения, в частности, рельсы, трубы, прокат. Создано несколько поколений оригинальных машин, которые эксплуатируются во многих странах мира, например, для сварки рельсов, применение которых позволило решить проблему создания бесстыковых «бархатных» рельсовых путей.

Созданы уникальные комплексы внутритрубных контактных машин «Север» для сварки магистральных трубопроводов диаметром до 1420 мм в условиях Крайнего Севера. Наряду с указанными стоит упомянуть машины для сварки высокопрочных сплавов на основе алюминия и титана, которые до настоящего времени работают на ракетостроительных заводах России и Украины.

В современной технике все больше используются конструкционные материалы нового поколения — стали и сплавы с управляемой дисперсностью и структурой, композиционные материалы на основе металлической и интерметаллидной матрицы, сложные полимеры, усиленные металлической составляющей, монокристаллы и особочистые металлы. Создаются новые технологические процессы сварки в твердой фазе — модификации классической холодной сварки, сварки трением, контактной, дуговой сварки, диффузионной сварки с активизацией поверхностных эффектов зоны соединения, магнитно-импульсная сварка.

Созданы оригинальные технологии сварки взрывом, которые нашли практическое применение при изготовлении различных изделий, ремонте трубопроводов под давлением, на монтаже силовых линий электропередач, кабелей связи и др. (В. М. Кудинов, В. Г. Петушков, Л. Д. Добрушин, Л. А. Волгин).

В 1950-е годы специалисты института предвосхитили перспективность применения электронного луча при изготовлении различных толстостенных изделий из сталей и высокопрочных сплавов на основе алюминия, титана и других материалов. Решены сложные задачи достижения стабильности электронного луча в атмосфере металлического пара, изучены особенности формирования узких и глубоких швов, найдены способы управления, которые обеспечивают воспроизводимость оптимальных режимов сварки. Все это позволило создать современное оборудование, которое получило международное признание (Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, Г. И. Лесков). Институт

экспортирует мощные электронно-лучевые установки во многие страны мира.

Большое внимание уделяется применению лазеров для сварки и наплавки. Первые практические результаты были получены в 1969 г. Позже по разработкам Института атомной энергии им. И. В. Курчатова, а затем и ИЭС им. Е. О. Патона созданы CO_2 -лазеры мощностью до 10 кВт, исследован процесс нагрева металла излучением лазера и сжатой дуги. В настоящее время особое внимание уделяется твердотельным и волоконно-оптическим лазерам на полупроводниках, у которых более высокий коэффициент полезного действия, чем у газоразрядных лазеров, что позволяет передавать излучение к месту сварки по волоконным световодам.

Способ дуговой сварки вольфрамовым электродом по слою активированного флюса-пасты, который получил впоследствии название А-ТИГ, разработан в ИЭС им. Е. О. Патона в середине 1960-х годов (Б. Е. Патон, А. М. Макара, Б. Н. Кушниренко, В. Н. Замков). Благодаря испарению флюса-активатора удается сжать столб дуги и в несколько раз увеличить глубину провара, повысить производительность сварки и улучшить форму швов. Эта оригинальная технология была создана в СССР и сейчас успешно развивается в странах СНГ. Усовершенствованная технология ПАТИГ получила признание в последнее время в странах дальнего зарубежья (К. А. Ющенко).

Созданы теоретические основы процессов дуговой сварки с использованием активирующих флюсов. Установлены основные закономерности влияния присадок флюсов на тепловые, динамические характеристики электрической дуги и форму сварочной ванны. Предложено объяснение механизма глубокого проплавления металла. Изучены физические процессы, протекающие в прианодном слое дуговой плазмы, на поверхности и в объеме сварочной ванны (И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, К. А. Ющенко).

Разработаны агломерированные флюсы, которые позволяют активно влиять на ход металлургических процессов сварки, управлять структурой и свойствами сварных швов и сварных соединений (К. К. Хренов, Д. М. Кушнерев, В. В. Головкин).

В конце 1980-х годов в институте начаты исследования гибридных (лазерно-дуговых и лазерно-плазменных) процессов сварки и обработки материалов. Благодаря им установлено, что при взаимодействии лазерного пучка с плазмой электрической дуги возникает особенный тип газового разряда — комбинированный лазерно-дуговой разряд, свойства которого отличаются как от свойств обычной электрической дуги, так и разряда, поддерживаемого сфокусированным лазерным излучением. Применение комбинированного

разряда открывает новые возможности управления концентрацией тепловой и электромагнитной энергии. Предложены конструкции лазерно-дуговых плазмотронов прямого и непрямого действия, создан ряд интегрированных плазмотронов разного технологического назначения. Разработаны новые процессы гибридной лазерно-плазменной сварки и наплавки, в том числе гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин (Б. Е. Патон, В. Д. Шелягин).

В 1960-х годы в институте начаты исследования технологии получения разных покрытий и композиционных материалов путем электронно-лучевого испарения компонентов и конденсации пара на поверхностях изделий или специальных подкладок. Электронно-лучевая технология нанесения покрытий, получившая применение в ряде отраслей техники, позволяет многократно повышать эксплуатационный ресурс изделий различного назначения, в частности, лопаток газовых турбин (Б. Е. Патон, Б. А. Мовчан, А. И. Устинов).

Введение в паровой поток активных газов или соответствующих добавок активных металлов позволило расширить гамму структур конденсируемых материалов и покрытий (многофазных, слоистых, пористых, градиентных). Это разнообразные защитные и конструкционные покрытия, специальные фольги, магнитные жидкости, структурные элементы твердооксидных топливных элементов и каталитических устройств, фильтры, мембраны и др.

Идея применения сварки при монтаже металлических конструкций в космическом пространстве захватила Б. Е. Патона и была поддержана генеральным конструктором академиком С. П. Королевым еще в первой половине 1960-х годов. Предварительные исследования включали создание и проверку аппаратуры и способов сварки в летающей лаборатории в условиях кратковременной динамической невесомости. В 1969 г. проведен первый технологический эксперимент по сварке в околоземном пространстве. На космическом корабле «Союз-6» космонавт В. Н. Кубасов осуществил опытную сварку с применением электронно-лучевой, плазменно-дуговой и дуговой сварки плавящимся электродом. Изучены особенности формирования сварных швов в условиях невесомости, доказано, что в космическом пространстве можно выполнять плотные и хорошо сформированные швы.

В 1979 г. успешно проверена идея нанесения разных металлических покрытий на поверхности отдельных элементов космической станции и приборов. Разработаны специальный аппарат «Испаритель» и универсальный ручной инструмент, предназначенный для сварки, пайки и нанесения покрытий. В 1984 г. космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков провели его испытания в от-

крытом космосе. Этим был начат цикл систематических многоцелевых исследований и экспериментов по отработке структурных элементов и наладке технологии сооружения крупногабаритных орбитальных конструкций и объектов. В 1986 г. в космосе сооружена конструкция в виде разборной фермы (эксперимент «Маяк»). Впервые выполнена пайка узлов ферменных конструкций. Результаты этих экспериментов использованы при создании ИЭС им. Е. О. Патона агрегата для разворачивания и складывания солнечных батарей многоразового использования орбитальной станции «Мир».

Многoletние исследования и достижения в области космических технологий высоко оценены генеральным конструктором ракетно-космических комплексов НПО «Энергия» академиком РАН Ю. П. Семеновым. Результаты этих работ обобщены в изданной в 1997 г. монографии Б. Е. Патона и В. Ф. Лапчинского «Welding in Space and Related Technologies». Исследования в области космических технологий продолжаются до настоящего времени (Е. А. Аснис).

Б. Е. Патон на протяжении многих лет возглавляет исследования электротехнических процессов сварки и электротермии. В этой области созданы новые источники питания (В. К. Лебедев, Н. Г. Остапенко, И. И. Заруба, А. С. Письменный, В. В. Андреев, А. Е. Коротынский, М. Н. Сидоренко, А. В. Лебедев), изучены системы управления и автоматического регулирования сварочным оборудованием и аппаратурой (Н. В. Подола, Ю. М. Ланкин, Ф. Н. Киселевский).

В последние годы продолжаются исследования оптимального построения систем управления и поиска параметров автоматического регулирования, которые наиболее полно отображают процесс образования сварного соединения.

Создан новый способ импульсно-дуговой сварки, который позволяет управлять процессом переноса электродного металла, что решило проблему механизированной сварки плавящимся электродом сплавов алюминия, титана и нержавеющей стали (Б. Е. Патон, П. П. Шейко, Н. В. Подола).

Найдены пути автоматического управления плавлением и переносом электродного металла с короткими замыканиями дугового промежутка при сварке в углекислом газе, создана аппаратура, которая позволяет достичь высоких показателей стабильности при реализации этого процесса.

Негативное влияние разнообразных возмущений, возникающих в процессе сварки, может быть нивелировано с помощью систем регулирования, способных обработать большой объем информации и выработать необходимые регулирующие действия. В начале 1970-х годов созданы первые образцы таких систем (Б. Е. Патон, Ф. Н. Киселевский). Интенсивное развитие работ в этом нап-

равлении привело к созданию с помощью микропроцессорной техники автоматических систем управления сварочными процессами, установками и механизированными линиями.

Результаты исследований, которые проводятся в институте, используются ОКТБ в разработках образцов сварочного оборудования (П. И. Севбо, А. И. Четверо, В. Е. Патон, В. Ф. Мошкин, М. Г. Бельфор, В. А. Сахарнов). Первые головные образцы такого оборудования изготовляют на Экспериментальном производстве института, а серийный выпуск производится на Опытном заводе сварочного оборудования института, а также на других заводах Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья. Большой вклад в создание Опытного завода сварочного оборудования и Экспериментального производства института внесли Г. Б. Асоянц и М. И. Бобровник, которые на протяжении многих лет руководили этими предприятиями.

В институте традиционно уделяется большое внимание созданию экономических, надежных и долговечных сварных конструкций. Выполнен комплекс фундаментальных и прикладных исследований в области статической и циклической динамической прочности сварных соединений, изучено их сопротивление хрупкому разрушению и разрушению от усталости, исследована работоспособность в условиях низких температур. Разработаны нормативные документы по проектированию и изготовлению сварных узлов металлоконструкций ответственного назначения. Созданы новые типы высокоэффективных сварных строительных конструкций, пролетных строений автодорожных и железнодорожных мостов, тяжелонагруженных конструкций машин и агрегатов горно-металлургического комплекса, уникальных конструкций превращаемого объема и др. (В. В. Шверницкий, Г. В. Раевский, А. А. Казимиров, В. И. Труфяков, О. И. Шумицкий, Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян).

Результатом исследований и разработок в области строительных сварных конструкций, выполненных учеными ИЭС им. Е. О. Патона, стало создание ряда выдающихся сооружений, к которым прежде всего относится уникальный цельносварной мост имени Е. О. Патона через Днепр. Принципы, подходы и конструктивно-технологические решения, используемые при его проектировании и сооружении, открыли дорогу широкому применению сварки в мостостроении. Этот мост получил признание Американского сварочного общества как выдающаяся сварная конструкция XX столетия. Опыт строительства моста имени Е. О. Патона использован при постройке мостов через Днепр в Киеве (Южного, Московского, Гаваньского, Подольско-Воскресенского, автодорожного и железнодорожного мостов) и мостов

в Днепропетровске и Запорожье, а также моста через реку Смолч в Каменец-Подольске.

Ярким примером нового подхода к возведению сварных конструкций высокой заводской готовности стало создание технологии разворачивания рулонированных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, благодаря которой в короткие сроки была решена проблема восстановления резервуарного парка страны, разрушенного в годы второй мировой войны (Г. В. Раевский).

В институте на протяжении ряда лет проводились исследования прочности сварных конструкций из труб (В. И. Новиков, О. И. Шумицкий, В. А. Ковтуненко, Э. Ф. Гарф, В. С. Гиренко).

Совместно с НИИ «Укрпроектстальконструкция» разработаны проекты и технологии строительства, которые успешно реализованы при возведении уникальных телевизионных башен в Киеве, Санкт-Петербурге, Ереване, Тбилиси, Витебске, Харькове. Большой интерес к проблемам сварки соединений из труб объясняется интенсивным освоением континентального шельфа и необходимостью ширококомасштабного строительства морских стационарных платформ добычи нефти и газа. В институте проводятся исследования прочности трубчатых сварных соединений при циклической нагрузке, разрабатываются специальные методики расчета усталости сварных соединений. Создан ряд нормативных документов, которые регламентируют проектирование морских сооружений.

Технологии сварки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, были успешно применены при сооружении музея Великой Отечественной войны и возведении грандиозного монумента «Родина-мать» в Киеве (К. А. Ющенко).

Важное значение имеет комплекс работ, которые выполняет институт по созданию и применению сталей высокой и повышенной прочности. Многолетняя эксплуатация ответственных сварных конструкций из высокопрочных сталей (мощное горнорудное и нефтяное оборудование, платформы для добычи нефти и газа в условиях континентального шельфа, автомобили с большой грузоподъемностью, строительно-дорожная и грузоподъемная техника, строительные сооружения и др.) убедительно свидетельствует о надежности и эффективности разработанных материалов и технологических процессов сварки (Б. С. Касаткин, В. Ф. Мусияченко).

Оценка прочности конструкций с эксплуатационными дефектами, определение и продление их остаточного ресурса занимают особое место в проводимых ИЭС им. Е. О. Патона исследованиях. Б. Е. Патон является инициатором и научным руководителем целевой научно-технической программы «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин»,

к выполнению которой привлечены многие академические институты, вузы, отраслевые институты и большое количество промышленных предприятий.

Огромное внимание уделяется развитию методов неразрушающего контроля качества и диагностики. Созданы автоматизированные установки для ультразвукового контроля сварных соединений труб большого диаметра, корпусов буровых долот, узлов энергетических установок, сварных соединений из легких сплавов и неметаллических материалов. Все большее распространение получают компьютеризованные дефектоскопы и высокочастотные акустические микроскопы, найдены эффективные области применения низкочастотных ультразвуковых волн и бесконтактного введения акустических волн в объекты, создаются системы цифрового радиационного контроля, разрабатываются методы лазерной интерферометрии.

Широкое развитие получили работы по акустоэмиссионной диагностике. Созданы системы непрерывного мониторинга сварных конструкций, к которым предъявляются повышенные требования безопасности эксплуатации (Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, В. А. Троицкий).

В институте развиваются работы по математическому моделированию сварочных процессов, технологий, конструкций, кинетике развития напряжений и деформаций. Созданы методики прогнозирования механических свойств, ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов (В. И. Махненко, Л. М. Лобанов).

Наряду с изучением сварочных процессов и технологий в институте на протяжении многих лет проводятся исследования по материаловедению. Разрабатываются новые конструкционные материалы, технологии их производства, исследуется связь состав-структура-свойства применительно к материалам различного назначения. ИЭС им. Е. О. Патона стал крупным центром материаловедения.

Институт оснащен мощной базой для проведения физико-химических исследований свойств материалов (Г. М. Григоренко), где работают высококвалифицированные специалисты по физике металлов, металловедению, электронной микроскопии, масс-спектрологии, Оже-спектроскопии, анализу газов в металлах и сварных швах, рентгенспектральному элементному анализу и другим специальностям. Оснащенный современным научным оборудованием институт обеспечивает проведение сложных материаловедческих исследований на самом высоком уровне.

С 1954 г. по инициативе Б. Е. Патона начаты исследования по использованию электрошлакового процесса для улучшения качества металлов и сплавов. В итоге возникло принципиально новое

направление в металлургии — электрошлаковый переплав, который в короткие сроки нашел широкое применение и получил мировое признание. Лицензии на этот процесс приобрели фирмы многих стран мира. Он используется для улучшения свойств жаропрочных, нержавеющих, инструментальных, шарикоподшипниковых и других сталей, а также специальных сплавов. Путем объединения процесса электрошлакового переплава и литья создано производство пустотелых слитков, сосудов высокого давления, запорной арматуры тепловых и атомных станций, литого штампового инструмента, валов судовых двигателей и других ответственных изделий (Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш).

Разработан процесс электрошлаковой наплавки прокатных валков с использованием жидкого присадочного металла, исследуются физико-металлургические проблемы электрошлаковых технологий (Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар), магнитная гидродинамика электрошлаковых процессов (Я. Ю. Компан).

Еще в 1959 г. были начаты работы по рафинированию металлов и сплавов с помощью электронного луча. Электронно-лучевая плавка оказалась эффективным способом повышения качества специальных сталей и сплавов на основе никеля и железа, эффективным технологическим процессом получения особо чистых ниобия, титана и многих сплавов на их основе (Б. А. Мовчан).

В последние годы успешно развивается электронно-лучевая технология получения слитков титана. Разработаны новые высокопрочные титановые сплавы, легированные алюминием, цирконием, ниобием, железом, конструкции промышленных электронно-лучевых установок с промежуточной емкостью. Многие из них не имеют аналогов в мировой практике (М. П. Тригуб, В. Н. Замков, С. В. Ахонин).

Получили развитие способ, оборудование и технология плазменно-дугового переплава металлов и сплавов. Возможности плазменно-дуговой технологии особенно расширились после разработки плазмотронов переменного тока, что позволило существенно повысить надежность конструкций плавильных агрегатов и источников питания.

Плазменно-дуговой переплав используется для производства высококачественных сложнлегированных и прецизионных сплавов (В. И. Лакомский, Г. М. Григоренко). Этот процесс позволяет легировать металл азотом из газовой фазы при производстве высокоазотистых сталей. Эффективна созданная в институте новая технология плазменно-дугового рафинирования поверхности слитков из прецизионных сплавов. Развивается плазменно-шлаковая технология (М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов). Многие из указанных технологий реализованы на Опытном заводе спецэлек-

тротметаллургии института (М. Л. Жадкевич, А. П. Поварчук).

В последние годы в мировой металлургической практике широко используется внепечная обработка металлургических расплавов. В ИЭС им. Е. О. Патона для этой цели используют порошковые проволоки. Созданы новые типы проволок, которые содержат высокоактивные элементы для микролегирования, модификации и десульфурации сталей и чугуна. Разработана технология и оборудование для изготовления порошковых проволок большого диаметра (И. К. Походня, В. Ф. Альтер). Эти исследования получили дальнейшее развитие в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича, Донецком политехническом институте, Донецком научно-исследовательском институте черной металлургии и на заводе «Универсальное оборудование».

Сегодня метод инжекционной металлургии широко применяется на металлургических заводах Украины и РФ, где с его помощью обработаны десятки миллионов тонн стальных расплавов.

В ИЭС им. Е. О. Патона успешно развиваются исследования в области пайки металлов и сплавов. Разработаны научные основы вакуумной пайки конструкций из нержавеющей сталей различных классов. Созданы оригинальные припои для пайки изделий из жаропрочных никелевых сплавов, технологические процессы и припои для пайки перспективных материалов: интерметаллидных и дисперсно-упрочненных сплавов, углеродных материалов, сплавов на основе титана и алюминия, созданы оригинальные реактивные флюсы для пайки алюминия. Новые технологии пайки широко используются при изготовлении деталей авиационных двигателей, космической и буровой техники (В. Ф. Хорунов).

В связи с открытием в послевоенные годы в СССР гигантских месторождений нефти и газа в ИЭС им. Е. О. Патона были созданы уникальные оригинальные технологии и оборудование для контактной сварки неповоротных стыков труб — комплексы «Север», которые широко использовались при строительстве магистральных трубопроводов из сталей различного класса прочности (Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. А. Сахарнов). С помощью контактной сварки сварено больше 70 тыс. км трубопроводов, в том числе около 6 тыс. км газопроводов большого диаметра в условиях Крайнего Севера. Создана оригинальная технология автоматической сварки неповоротных стыков труб самозащитной порошковой проволокой с принудительным формированием шва — комплекс «Стык» (Б. Е. Патон, И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, В. Е. Патон, В. Я. Дубовецкий). С помощью этой технологии построено свыше 10 тыс. км магистральных газо- и нефтепроводов большого диаметра, среди которых

«Дружба», «Средняя Азия–Центр», «Уренгой–Помары–Ужгород», «Хива–Бейнеу», «Шебелинка–Измаил», «Ямал–Западная граница», «Ямал–Поволжье» и другие газопроводы, а также нефти и продуктопроводы.

Большое внимание уделяется реализации достижений современной науки и техники в практической медицине. В 1990-х годах Б. Е. Патон предложил использовать сварку для соединения живых тканей и организовал творческий коллектив ученых ИЭС им. Е. О. Патона, Института хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова, Центрального госпиталя Службы безопасности Украины и других медицинских учреждений. Это сотрудничество позволило создать новый способ соединения (сварки) мягких живых тканей (Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, А. В. Лебедев).

В последние годы процесс сварки живых тканей совершенствовался и развивался. Исследованы свойства тканей различных органов человека после операций, созданы новая сварочная техника и методы управления процессом сварки, выполнено математическое моделирование нагрева тканей при прохождении по ним токов высокой частоты, экспериментально определены электрофизические свойства биологических тканей и прочность сварных соединений. Разработаны источник питания аппарата электрическим током с автоматической системой управления, а также инструменты для сварки различных видов биологических тканей. Новые образцы оборудования успешно прошли проверку в медицинских учреждениях. За это время накоплен огромный опыт — проведено больше 20 тыс. операций на различных органах человека. Способ сварки живых тканей используется в клиниках Киева и 11 областей Украины, осваивается медицинскими учреждениями Москвы, Санкт-Петербурга, проходит испытание в странах дальнего зарубежья. Сократилось время хирургических операций, снижена вероятность послеоперационных осложнений, уменьшилась потеря крови.

В институте работают специализированные советы по защите докторских и кандидатских диссертаций. Сотрудниками института защищено более 130 докторских и около 700 кандидатских диссертаций. Институт издает ряд научно-технических журналов — «Автоматическая сварка», «Современная электрометаллургия», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», а также «The Paton Welding», который распространяется за рубежом.

В институте выросли десятки и сотни талантливых ученых и инженеров. Недаром сейчас среди патоновцев достаточно много академиков и членов-корреспондентов НАН Украины, десятки докторов и сотни кандидатов наук. Девять работ, в выполнении которых принимали участие сотрудники института, удостоены Ленинских премий СССР в области науки и техники, 24 работы — Государственных премий СССР, 34 работы — Государственных премий УССР и Украины. Их имена известны не только в нашей стране, но и далеко за ее пределами.

Многие работы, о которых говорилось выше, являются плодом труда большого и дружного коллектива. Сплочению коллектива института способствуют личные качества его руководителя. Борис Евгеньевич всегда преисполнен идеями, которыми щедро делится со своими коллегами.

Один из основных принципов, заложенных Е. О. Патоном при создании института и развитых Б. Е. Патоном, — проведение целенаправленных фундаментальных исследований и тесная связь науки с производством. Этот принцип постоянно воплощается в жизнь на протяжении всей 75-летней деятельности института.

Научные и конструкторские отделы института, экспериментальные мастерские, опытное конструкторско-технологическое бюро, инженерные центры, экспериментальные производства, опытные заводы создавались на протяжении всей истории института. Они неотъемлемые звенья системы организации исследований и внедрения их результатов в производство.

Реализация этой системы дала возможность создать уникальные конструкции, оборудование, материалы, технологии, внедрение которых стимулировало развитие многих отраслей промышленности — машино- и судостроение, ракетно-космический комплекс, авиастроение, энергетика, горнопромышленный комплекс, металлургия и химическое производство, строительство и эксплуатация систем трубопроводного транспорта, строительная индустрия и др.

Самоотверженный труд коллектива института высоко оценен государством и получил мировое признание. Институт награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, многим сотрудникам института вручены ордена и медали СССР, УССР и Украины.

И. К. Походня, академик НАН Украины



ПРОЧНОСТЬ И СТРУКТУРА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И СВАРКОЙ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, А. А. ЧАЙКА, И. Н. КЛОЧКОВ, М. Р. ЯВОРСКАЯ, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ степени разупрочнения и уровня прочности сварных соединений пластичных низколегированных алюминиевых сплавов и высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов, полученных трением с перемешиванием и неплавящимся электродом. Показано, что прочность сварных соединений пластичных низколегированных сплавов одинакова при обоих способах сварки. Деформационное упрочнение швов высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов, полученное при сварке трением, обеспечивает более высокий уровень их прочности, чем при сварке плавлением.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, аргонодуговая сварка, плавящийся электрод, алюминиевые сплавы, степень разупрочнения, предел прочности, структура

Алюминиевые сплавы широко используются при изготовлении сварных конструкций в различных областях машиностроения. В зависимости от назначения и условий эксплуатации изменяются предъявляемые к ним требования, а следовательно, и применяемые при их изготовлении марки сплавов. Так, для слабонагруженных узлов или отдельных элементов сложной формы могут быть использованы пластичные низколегированные алюминиевые сплавы, легко поддающиеся объемному деформированию даже в холодном состоянии. В конструкциях ответственного назначения, подвергающихся значительному силовому воздействию, применяются высокопрочные сложнолегированные алюминиевые сплавы. Для получения неразъемных соединений в большинстве случаев используется аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (АДСНЭ), обеспечивающая требуемое качество швов и высокий уровень их прочности [1–5].

В настоящее время для изготовления различных сварных конструкций из алюминиевых сплавов все больше применяется сварка трением с перемешиванием (СТП). При этом принцип образования шва основан на нагреве металла до пластического состояния в результате трения, перемешивании его по всей толщине свариваемых кромок и деформировании в замкнутом объеме [6, 7]. Такой способ получения неразъемных соединений наиболее приемлем для пластичных материалов, имеющих низкую температуру плавления. Он может быть реализован для различных марок

алюминиевых сплавов и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами получения неразъемного соединения [8, 9]:

образование шва в твердой фазе позволяет избежать возникновения горячих трещин, макровключений оксидной пленки, пор и других дефектов, обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла при сварке плавлением;

нагрев металла в зоне сварки в результате трения исключает ультрафиолетовое излучение дуги, выделение дыма и паров металла и снижает уровень шума;

формирование соединения без расплавления металла можно осуществлять без применения защитного газа и в любом пространственном положении;

отсутствие дугового разряда и расплавленного металла исключает потерю легирующих элементов в шве на угар и необходимость повышения их содержания за счет применения присадочных материалов;

получение шва без дугового разряда позволяет беспрепятственно использовать этот процесс при наличии сильных электромагнитных полей;

перемешивание пластифицированного металла под избыточным давлением в ограниченном объеме приводит к дроблению макрочастиц оксидных включений, снижая требования к предварительной подготовке поверхностей свариваемых кромок;

проникновение наконечника инструмента на всю глубину стыка позволяет сваривать металл различной толщины без специальной разделки кромок;

протекание процесса сварки при более низкой температуре приводит к уменьшению степени ра-



Таблица 1. Механические свойства листов из алюминиевых сплавов толщиной 1,8 мм

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град
АМцН	218	178	6	180
АМг2М	176	88	23	180
АМг5М	332	160	22	142
АМг6М	359	210	22	96
1420	459	322	11	50
1201	423	303	12	60
1460	565	523	9	36

зупрочнения материала и уровня остаточных деформаций в конструкциях;

повышение эффективности использования энергии при СТП и уменьшение температуры нагрева металла в зоне сварки снижают энергоемкость процесса по сравнению со сваркой плавлением;

процесс сварки можно легко автоматизировать и обеспечить стабильное качество швов без высокой квалификации оператора.

Благодаря таким преимуществам процесс СТП открывает более широкие технологические возможности для изготовления сварных конструкций из таких сплавов, соединить которые сваркой плавлением невозможно из-за образования горячих трещин в швах; обеспечения более высокого уровня прочности швов термически упрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов; соединения метастабильных сплавов, полученных быстрой кристаллизацией металла из расплава, композитов и наноматериалов; получения сварных узлов, которые нецелесообразно экономически или невозможно практически прессовать или отливать целиком из серийно изготавливаемых отдельных профилей.

Цель данной работы — сравнение прочности, степени разупрочнения и структуры сварных соединений пластичных низколегированных и вы-

сокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов, полученных способами СТП и АДСНЭ.

Для проведения экспериментальных исследований использовали пластичные низколегированные алюминиевые сплавы АМцН, АМг2М и АМг5М, а также высокопрочные сложнолегированные алюминиевые сплавы АМг6М, 1420, 1201 и 1460. Механические свойства свариваемых листов толщиной 1,8 мм приведены в табл. 1. АДСНЭ выполняли со скоростью 20 м/ч на установке MW-450 («Фрониус», Австрия) с использованием соответствующих присадочных материалов (табл. 2), СТП — на сконструированной в ИЭС им. Е. О. Патона лабораторной установке. Из полученных сварных соединений изготавливали стандартные образцы для определения предела прочности при одноосном растяжении. Испытания проводили с помощью универсальной многоцелевой сервогидравлической системы MTS 810. Образцы, полученные АДСНЭ, испытывали после снятия проплавов швов заподлицо с основным металлом, а также с дополнительно зачищенными их усилениями, поскольку в сварных конструкциях применяются те и другие виды соединений. В образцах, полученных СТП, усиления и проплавы отсутствуют, поэтому дополнительная механическая зачистка швов не требовалась. Степень разупрочнения металла в зоне сварки оценивали по результатам измерения его твердости на приборе ROSKWELL при нагрузке 600 Н и диаметре шарика 1/16". Для сварных соединений пластичных сплавов АМцН и АМг2М микротвердость металла измеряли с помощью микротвердомера PMT-3 при нагрузке 0,1 Н. Исследования микроструктуры полученных сварных соединений проводили с использованием оптического микроскопа МИМ-8М. Поперечные шлифы соединений, полученных АДСНЭ и СТП, предварительно подготавливали с помощью электролитического полирования и дополнительного травления их в растворе хлорной, азотной и плавиковой кислот.

Таблица 2. Режимы сварки алюминиевых сплавов различными способами

Марка сплава	АДСНЭ				СТП	
	Присадочный материал (размер, мм)	$v_{пр}$, м/ч	$I_{св}$, А	Q_{Ar} , л/мин	N , об/мин	$v_{св}$, м/ч
АМцН	АМцН (4,5×2,0)	—	140	15	2880	38
АМг2М	АМг2М (4,5×2,0)	—	135	15	2880	38
АМг5М	СвАМг5 (Ø 1,6)	82	140	15	1420	14
АМг6М	СвАМг6 (Ø 1,6)	82	130	15	1420	8
1420	СвАМг63 (Ø 1,6)	82	130	20	1420	14
1201	Св1201 (Ø 1,6)	82	145	15	1420	14
1460	Св1201 (Ø 1,6)	82	140	20	1420	8



Таблица 3. Предел прочности сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных различными способами сварки

Марка сплава	АДСНЭ				СТП	
	Образец с усилением		Образец без усиления		Образец без усиления	
	σ_B , МПа	Место разрушения	σ_B , МПа	Место разрушения	σ_B , МПа	Место разрушения
АМцН	113	ЗТВ	113	ЗТВ	113	ЗТМВ
АМг2М	170	»	170	»	170	ЗТВ
АМг5М	320	»	300	Шов	320	»
АМг6М	345	ЗС	324	»	336	ЗТМВ
1420	373	»	320	»	342	ЗС
1201	296	»	239	»	310	»
1460	311	»	257	»	309	ЗТМВ

Примечание. Приведены средние значения показателей по результатам испытания трех-пяти образцов.

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить степень разупрочнения, уровень прочности и структурные особенности соединений, полученных сваркой плавлением и в твердой фазе. Установлено, что при АДСНЭ пластичных низколегированных алюминиевых сплавов АМцН и АМг2М минимальная твердость имеет место в металле ЗТВ, где и происходит разрушение образцов при растяжении, а в сварных соединениях сплава АМг5М минимальная твердость металла — в центральной части шва. Поэтому образцы без усиления разрушаются по шву, а с усилением — по ЗТВ.

При СТП сплава АМцН минимальная твердость металла отмечается в зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) со стороны отхода инструмента, где и происходит разрушение образцов. Сварные соединения сплавов АМг2М и АМг5М, полученные СТП, разрушаются в ЗТВ,

где твердость металла минимальная. Следует отметить, что минимальные значения твердости металла в зоне разрушения образцов сварных соединений сплавов АМцН и АМг2М, полученных обоими способами сварки, примерно одинаковы, их предел прочности находится на уровне соответственно 113 и 170 МПа (табл. 3). Только образцы без усиления из сплава АМг5М, полученные АДСНЭ, имеют меньшую (300 МПа) прочность и разрушаются в центральной части шва, где металл характеризуется минимальной твердостью. Поэтому структурные изменения в металле шва и зонах сплавления (ЗС) его с основным металлом, происходящие при сварке этих сплавов плавлением или в твердой фазе (рис. 1), практически не влияют на прочность сварных соединений.

Характер разупрочнения металла в ЗС при СТП различный для высокопрочных сложнеле-

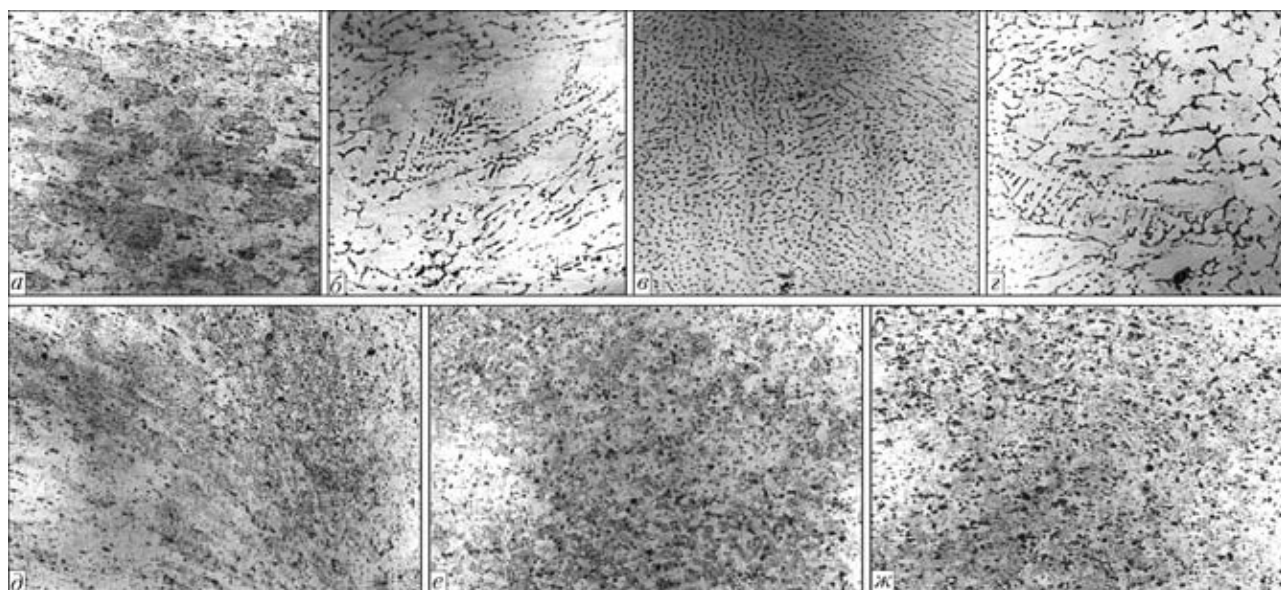


Рис. 1. Микроструктура (X400) основного металла (а) и сварных соединений сплава АМг2М, полученных АДСНЭ (б, в — ЗС шва с основным металлом; в — шов) и СТП (д, ж — соответственно ЗТМВ со стороны набегающего и отхода инструмента; е — ядро шва)

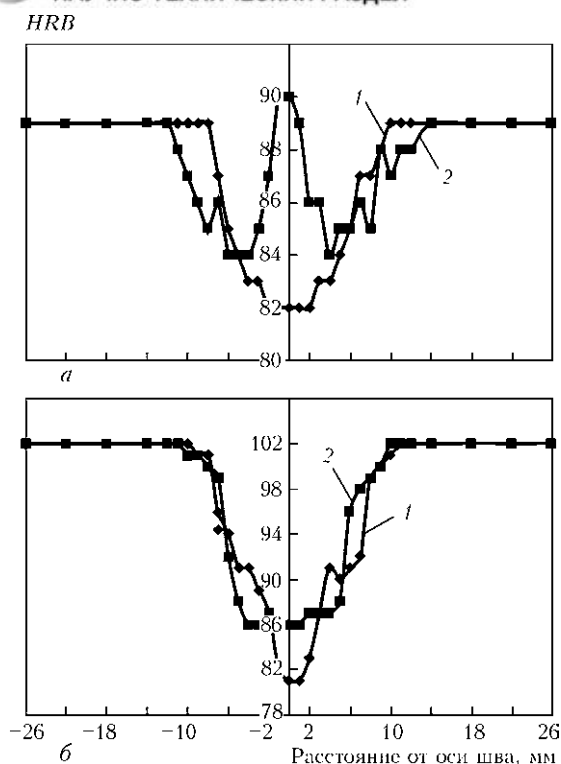


Рис. 2. Распределение твердости металла сварных соединений сплава АМг6М (а) и 1420 (б), полученных АДСНЭ (1) и СТП (2)

гированных деформируемых и термически упрочняемых сплавов.

Так, при сварке в твердой фазе сплава АМг6М образование мелкодисперсных зерен в шве приводит к его деформационному упрочнению (рис. 2, а). Поэтому разрушение таких образцов происходит по ЗТВ, где твердость металла минимальная, а прочность находится на уровне 336 МПа. Образцы без усиления, полученные способом АДСНЭ, разрушаются по шву и имеют предел прочности 324 МПа. Максимальной прочностью (345 МПа) характеризуются образцы с

усилением, разрушающиеся при растяжении по ЗС шва с основным металлом.

В термически упрочняемых сплавах (1420, 1201 и 1460) твердый раствор находится в пересыщенном состоянии. Поэтому в результате термомеханического воздействия в швах, кроме измельчения зерен, происходит разупрочнение металла, обусловленное выделением избыточных интерметаллидных фаз из твердого раствора и их коагуляцией. Мелкие упрочняющие фазы в ядре шва частично растворяются, а крупные легкоплавкие интерметаллидные включения частично расплавляются, образуя новый твердый раствор. В результате разупрочнение, обусловленное выделением избыточных фаз, преобладает над упрочнением, достигнутым в результате уменьшения размера зерен в швах, полученных СТП (рис. 2, б). При этом твердость металла шва, ЗС его с основным металлом и ЗТМВ практически одинакова, разрушение образцов термически упрочняемых сплавов происходит на этих участках.

В сварных соединениях таких сплавов, полученных АДСНЭ, минимальная твердость металла наблюдается в центральной части швов, где и происходит разрушение образцов без усиления. Однако предел прочности сварных соединений, полученных СТП, всегда выше, чем образцов без усиления, выполненных АДСНЭ. При этом разница в прочности существенно зависит от химического состава свариваемого сплава. Так, если для сплава 1420 она составляет всего 22 МПа, то для сплавов 1460 и 1201 — соответственно 52 и 71 МПа. Это обусловлено особенностями формирования швов при АДСНЭ и СТП. Образование соединения в твердой фазе в результате перемещения пластифицированного металла в ограниченном объеме при избыточном давлении способствует измельчению зерен, увеличению объемной доли границ и дроблению интерметаллидных фаз. При сварке плавлением из расплава

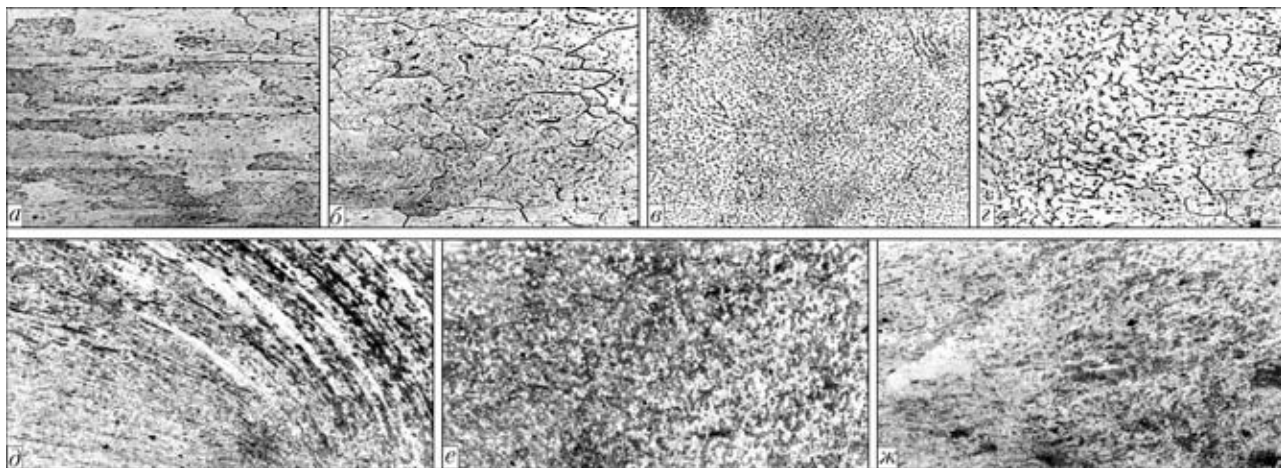


Рис. 3. Микроструктура (X400) основного металла (а) и сварных соединений сплава 1460, полученных АДСНЭ (б, в — ЗС шва с основным металлом; г — шов) и СТП (д, ж — соответственно ЗТМВ со стороны набегающего и отхода инструмента; е — ядро шва)



сварочной ванны при небольшой скорости его охлаждения кристаллизуются крупные зерна литого металла шва (рис. 3).

Образцы с усилением, полученные АДСНЭ, всегда разрушаются по ЗС шва с основным металлом и имеют более высокую прочность, чем образцы без усиления, разрушающиеся по металлу шва. Однако по сравнению с образцами, полученными СТП, их предел прочности может быть выше (1420), ниже (1201) или находиться на одном уровне (1460) в зависимости от свойств свариваемого алюминиевого сплава.

В заключение следует отметить, что прочность сварных соединений пластичных низколегированных алюминиевых сплавов, полученных СТП и АДСНЭ, находится практически на одном уровне, поскольку разрушение образцов происходит в ЗТВ, где степень разупрочнения металла одинакова.

Деформационное упрочнение швов, происходящее при СТП высокопрочных сложнлегированных алюминиевых сплавов АМг6М, 1420, 1201 и 1460, обеспечивает более высокий уровень их прочности, чем у образцов без усиления, полученных АДСНЭ.

Перемещение пластифицированного металла при избыточном давлении в ограниченном пространстве при СТП способствует формированию в центральной части шва ядра с ультрадисперсной структурой, а в ЗТМВ — изогнутых вытянутых и равноосных зерен, ориентированных в направлении перемещения инструмента. Измельчение зерен, увеличение объемной доли их границ и

дробление интерметаллидных фаз в швах при СТП алюминиевых сплавов способствует снижению уровня их разупрочнения по сравнению с АДСНЭ.

1. *Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. — М.: Металлургия, 1984. — 528 с.*
2. *Рабкин Д. М., Игнатьев В. Г., Довбищенко И. В. Состояние и перспективы применения алюминиевых сплавов в сварных конструкциях. — Киев: Наук. думка, 1975. — 48 с.*
3. *Колобнев Н. И., Фридляндер И. Н. Алюминий-литиевые сплавы — новый этап снижения массы летательных аппаратов // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: Сб. науч. тр. — М.: ГИ ВИАМ, 1994. — С. 89–92.*
4. *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур, В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая. — Киев: Екотехнологія, 2006. — 112 с.*
5. *Овчинников В. В., Дриц А. М., Крымова Т. В. Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминий-литиевого сплава 1460 // Свароч. пр-во. — 1997. — № 12. — С. 26–29.*
6. *Dawes C. J. An introduction to friction stir welding and its development // Weld. and Metal Fabr. — 1995. — № 1. — P. 13–16.*
7. *Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Яворская М. Р. Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / За ред. Б. Є. Патона. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2006. — С. 365–367.*
8. *Kallee S., Nicholas D. Causing a stir in the future // Welding and Joining. — 1998. — № 2. — P. 18–21.*
9. *Ищенко А. Я., Подъяльников С. В., Покляцкий А. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2007. — № 11. — С. 32–38.*

Comparative analysis of the degree of softening and level of strength of welded joints of ductile low-alloyed aluminium alloys and high-strength complex-alloyed aluminium alloys produced by friction stir and non-consumable electrode welding has been performed. It is shown that the strength of welded joints of ductile low alloys is the same with both welding processes. Deformation strengthening of welds of high-strength complex aluminium alloys achieved in friction welding, provides a higher level of their strength than in fusion welding.

Поступила в редакцию 30.01.2009

24–27 ноября 2009 г.

VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2009

УКРАИНА, КИЕВ, МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР

В рамках форума состоится научно-практическая конференция
«Технические решения для систем автоматизации производства»

Украина, 02660, Киев, Броварской проспект, 15

тел.: +380 44 201-11-78, 206-87-96

www.tech-expo.com.ua; www.iec-expo.com.ua



СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗВЕРТКОЙ ПУЧКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Ю. Н. ЛАНКИН, А. А. БОНДАРЕВ, доктора техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Е. И. ДОВГОДЬКО, В. А. ДЬЯЧЕНКО, инженеры (НП «СОЛЮ», г. Киев)

Описана микропроцессорная система управления разверткой электронного пучка при электронно-лучевой сварке и компьютерная программа графического проектирования разверток. Система позволяет реализовать развертки с произвольным результируемым распределением плотности мощности электронного пучка в зоне сварки. Во время проектирования развертки задается траектория, мгновенная мощность электронного пучка в каждой точке и отображается результирующее распределение плотности мощности пучка. Программа изменения токов отклоняющих катушек вычисляется автоматически.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, развертка электронного пучка, микропроцессорный контроллер, графическое компьютерное проектирование развертки

Свойства электронного пучка (малая инерционность и широкий диапазон регулирования мощности) позволяют получать источники сварочного нагрева с произвольным поверхностным распределением плотности мощности в области сварки. Электронный пучок может обеспечить почти неограниченное разнообразие режимов сварки, термической и размерной обработки, зондирования сварочного стыка. При этом зондирование, сварка и термообработка могут проводиться одним и тем же пучком одновременно. Однако реализовать эти преимущества электронного луча в полной мере можно только средствами электронной автоматики. Разработано сравнительно много аналого-дискретных электронных устройств периодического электромагнитного отклонения электронных пучков для сварки [1, 2] и термообработки [3, 4]. Их недостатками являются низкая точность, сложность настройки, ограниченные функциональные возможности. Зачастую электронно-лучевые установки комплектуются простейшими приборными синусно-косинусными генераторами.

Технически более совершенны цифровые системы периодического отклонения электронного пучка. Формирование периодических напряжений специальной формы в таких системах можно выполнять программно или аппаратно. Каждая управляющая ЭВМ, которыми, как правило, комплектуются современные установки для электронно-лучевой сварки (ЭЛС), позволяет запрограммировать практически любой закон изменения во времени сигнала отклонения электронного пучка. Однако частота такого сигнала ограничена десятками герц и при этом ЭВМ целиком загружена выполнением только этих функций.

Гораздо проще эти задачи решаются аппаратными средствами. Необходимая программа одного периода отклонения электронного пучка записывается в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Управляемый по частоте генератор кодов последовательно адресует ячейки ПЗУ и записанный в них код тока электромагнитного отклонения электронного пучка преобразуется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) в пропорциональное аналоговое напряжение [5, 6]. Основным недостатком этих генераторов является неудобство программирования ПЗУ. Для перепрограммирования ПЗУ необходимо извлечь микросхему ПЗУ из панельки, поместить в программатор и записать в нее новую программу, предварительно подготовленную на компьютере. Это занимает много времени и на практике очень неудобно.

Всех этих недостатков лишены современные микроконтроллерные системы программного управления отклонением электронного пучка со специализированным программным обеспечением компьютерного проектирования разверток.

Структурная схема микроконтроллерного генератора разверток приведена на рис. 1. Управляющая часть системы выполнена на микроконтроллере C8051F022 фирмы «Cygnal». Связь с компьютером осуществляется по стандартному последовательному интерфейсу RS-232. По этому интерфейсу в микроконтроллер из компьютера загружаются до 32 программ, после чего он может работать автономно. При постоянной связи с компьютером количество программ практически не ограничено. Запись программы в контроллер занимает единицы миллисекунд и может осуществляться даже во время сварки.

С помощью ЦАП, входящих в состав микроконтроллера, цифровой код развертки преобразуется в аналоговые напряжения, которые поступают на мощный преобразователь напряжение —

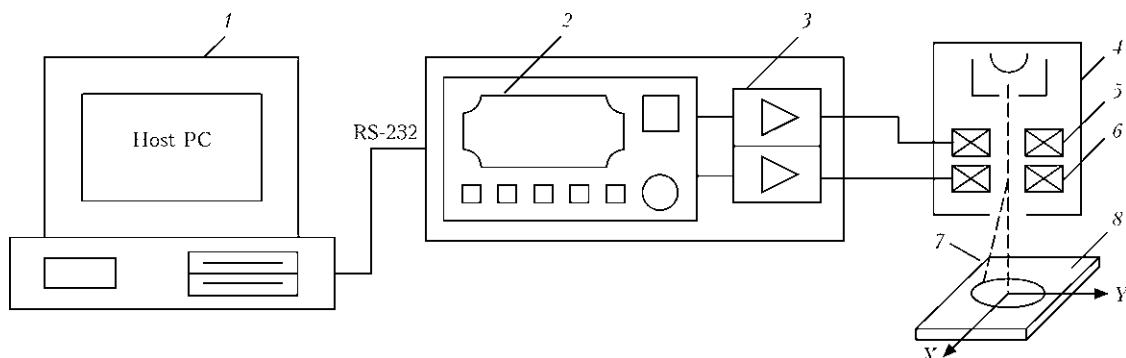


Рис. 1. Структурная схема контроллера развертки электронного пучка для сварки: 1 — компьютер; 2 — контроллер; 3 — усилитель мощности; 4 — электронно-лучевая пушка; 5 — катушка отклонения электронного пучка по оси X ; 6 — катушка отклонения электронного пучка по оси Y ; 7 — электронный пучок; 8 — свариваемое изделие

ток 3 (рис. 1). Контроллер имеет собственные органы управления для корректировки амплитуды развертки отдельно по координатам X и Y , по обеим координатам одновременно XY , частоты развертки F , выбора любой из записанных в память контроллера разверток P . Вся текущая служебная информация, а именно, номер развертки, относительная амплитуда развертки по каждой координате и частота развертки отображаются на многострочном жидкокристаллическом дисплее. Общий вид контроллера приведен на рис. 2.

Программа «Проектирование развертки» представляет собой средство для быстрого графического проектирования траектории перемещения электронного пучка по поверхности нагрева вследствие периодического электромагнитного отклонения при ЭЛС и термообработки электронным лучом. Для периодического отклонения электронного пучка обычно задается закон изменения во времени тока в отклоняющих катушках системы электромагнитного отклонения электронно-лучевой пушки. Связать траекторию электронного пучка с током отклоняющей катушки не представляет особого труда только в простейших случаях круговой и линейной разверток. Данная система позволяет проектировать не только траекторию перемещения электронного пучка, но и интенсивность нагрева в любом месте траектории. Кроме того, во время проектирования имеется возможность просмотра результирующего распределения плотности мощности электронного пучка в области нагрева с учетом конечных значений радиуса электронного пучка. Экран компьютерного проектирования развертки приведен на рис. 3.

Траектория электронного пучка отображается в прямоугольном окне «Траектория электронного луча» (рис. 3) с относительными размерами ± 128 по координатам X и Y . Во время одного цикла периодической развертки электронный пучок занимает последовательно 16 положений в области его воздействия. Положение остановки пучка в каждой из 16 точек траектории отображается в виде окружности небольшого диаметра. Переме-

щение пучка из одной точки в другую отображается соединительными прямыми линиями. Положение каждой точки пучка в цикле развертки задается перетаскиванием мышкой ее изображения в любое место окна «Траектория электронного луча». Цифровое значение координат каждой точки отображается в соответствующей ячейке таблицы, представленной на рис. 3. Таким образом, траектория электронного пучка в общем случае может быть любой.

Интенсивность теплового воздействия электронного пучка в каждой точке определяется относительным временем пребывания в ней, т. е. на какую часть периода развертки пучок останавливается в данной точке. Изменение относительной длительности пребывания электронного пучка в точке эквивалентно относительному изменению тока луча в данной точке при одинаковом времени его пребывания в каждой точке. Естественно, для этого частота развертки электронного пучка должна быть достаточно высока. Время пребывания пучка в каждой точке задается с некоторой дискретой Δt . Общее количество временных интервалов N в течение одного периода T развертки устанавливается программой от 16 до 256. Период развертки может варьироваться от $16\Delta t$ до $256\Delta t$. Минимальное значение Δt определяется только схемотехникой и элементной базой приме-



Рис. 2. Внешний вид контроллера развертки электронного пучка для сварки



няемого контроллера развертки. Например, для описываемого контроллера, выполненного на микроконтроллере C8051F022 фирмы «Signal», минимальное значение Δt составляет 40 мкс и может быть увеличено с дискретой 40 мкс до 4 мс.

Помимо минимального значения Δt , определяемого контроллером, реальная максимальная частота развертки зависит от индуктивности отклоняющих катушек, напряжения питания усилителя тока отклоняющих катушек и установленной амплитуды развертки. Чем меньше индуктивность катушек отклонения, выше напряжение питания и меньше амплитуда развертки, тем больше максимально возможная частота развертки.

Относительная плотность тока пучка регулируется изменением амплитуды соответствующего столбца столбчатого графика перетаскиванием вершины столбца мышью. Относительная плотность тока (количество временных интервалов) в остальных позициях электронного пучка автоматически пересчитывается, чтобы период развертки остался неизменным. Количество временных интервалов в каждой позиции электронного пучка (относительная плотность тока) отображается столбиком столбчатого графика и в соответствующей ячейке J таблицы на рис. 3.

Благодаря тепловой инерционности поверхности нагрева тепловое воздействие периодически отклоняемого электронного пучка эквивалентно

воздействию суммы 16 неподвижных электронных пучков, распределенных по поверхности нагрева. Сумма токов эквивалентных неподвижных лучей равна току периодически отклоняемого электронного луча, а ток каждого луча пропорционален относительному времени пребывания луча в соответствующей точке останова. Таким образом, по тепловому действию периодически отклоненный электронный луч можно представить неподвижным электронным лучом со сложным поперечным распределением плотности тока.

Анализ графиков распределения плотности тока такого луча дает гораздо больше для прогнозирования теплового воздействия электронного луча, чем анализ кривых токов отклоняющих катушек, что обычно имеет место на практике. Результирующее эквивалентное распределение плотности тока, отображаемое на трехмерном графике в окне «Результирующее распределение тока луча», подсчитывается следующим образом.

Плотность мощности электронного пучка $j(x, y)$ в первом приближении можно считать нормально-круговым:

$$j(x, y) = J_m \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{r_l^2} \right), \quad (1)$$

где J_m — амплитуда плотности тока; r_l — дисперсия плотности тока; x, y — расстояние от центра луча до данной точки.

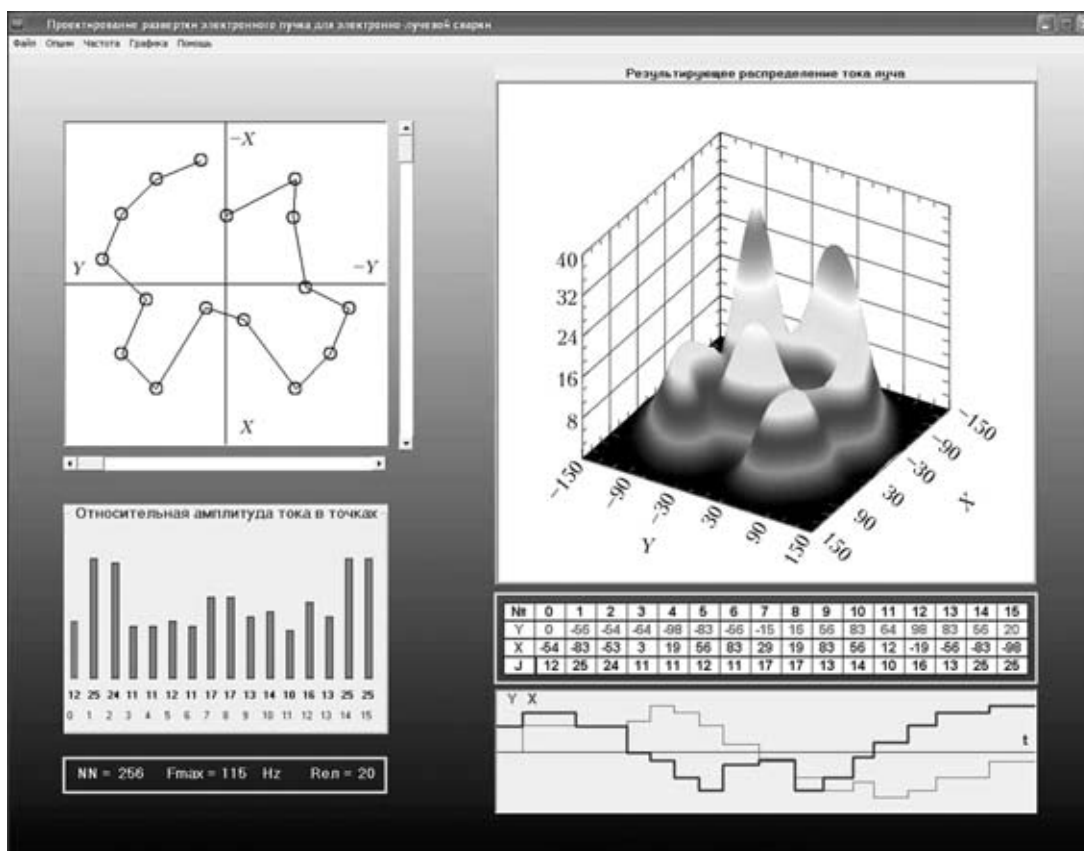


Рис. 3. Экран компьютерного проектирования развертки

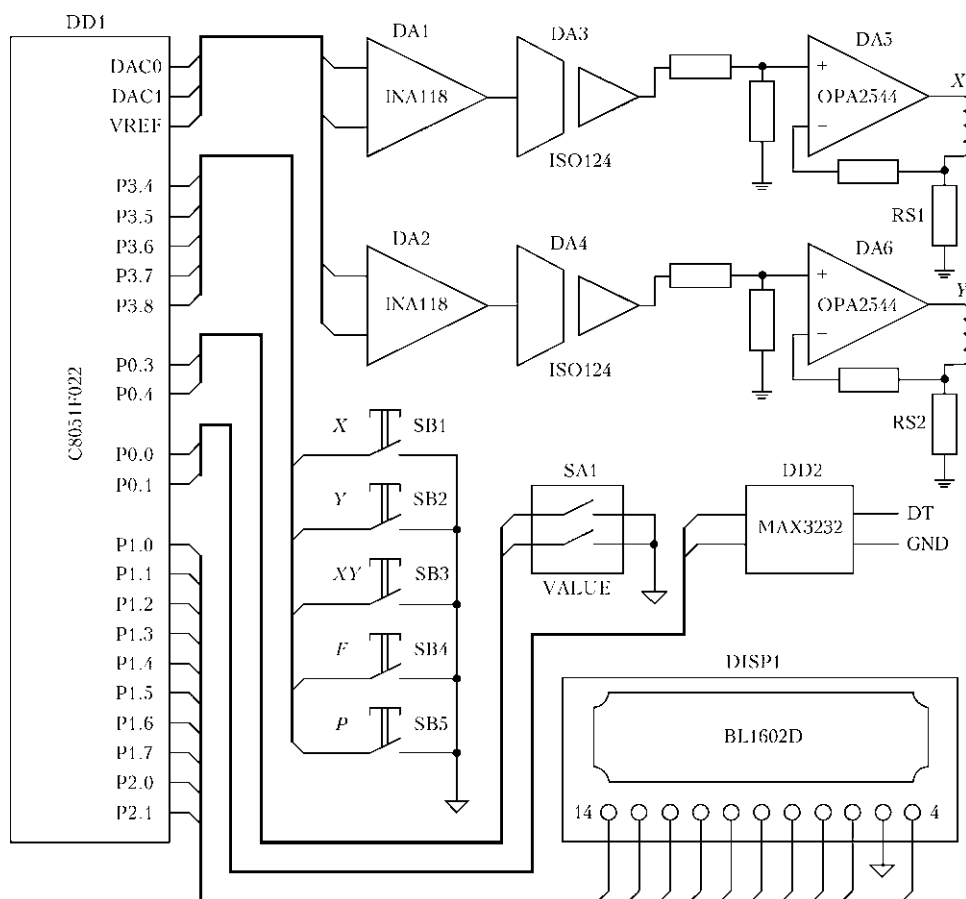


Рис. 4. Функциональная схема контроллера развертки электронного пучка для сварки

Результирующая плотность тока от действия 16 одновременно действующих электронных лучей с амплитудами J_{mi} в точках x, y будет

$$\bar{j}(x, y) = \sum_{i=1}^{16} J_{mi} \exp \left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{r_{\pi}^2} \right), \quad (2)$$

где J_{mi} — амплитуда плотности тока в i -й точке останова пучка, $J_{mi} = J_i/N$; J_i — количество интервалов времени Δt пребывания пучка в i -й точке останова луча; N — общее количество временных интервалов в периоде развертки; x_i, y_i — координаты i -й точки останова луча.

Реальная результирующая плотность тока развернутого пучка зависит от радиуса пучка в плоскости сварки. Для получения более реалистичного изображения результирующего распределения плотности тока пучка в зоне его воздействия, подсчитываемого по уравнению (2), в окне «Beam Radius» из меню «Опции» задается относительное значение радиуса электронного луча r_{π} .

Для удобства анализа результирующего распределения его изображение можно поворачивать, изменяя угол места и азимут.

Запись в файл спроектированной развертки осуществляется командой Safe из меню «Файл». Запись спроектированной развертки в контроллер

осуществляется командой Sent to Controller из меню «Файл».

Запись в файл и ППЗУ контроллера отклонения луча спроектированной развертки осуществляется командой «Запись».

Функциональная схема микропроцессорного контроллера приведена на рис. 4. Аналоговые напряжения развертки с выходов ЦАП DAC0, DAC1 микроконтроллера DD1 поступают на входы согласующих инструментальных усилителей DA1 и DA2. Изолирующие усилители DA3 и DA4 осуществляют гальваническую развязку управляющей и силовой части контроллера. Мощные операционные усилители DA5 и DA6, включенные по схеме с глубокой отрицательной обратной связью по выходному току, осуществляют преобразование напряжений разверток в ток отклоняющих катушек. Кнопками SB1–SB5 осуществляется выбор изменяемого параметра. Импульсный датчик вращения с индикацией направления SA1 используется для изменения значения выбранного параметра. Амплитуду и частоту развертки можно регулировать от 100 % до 0 через 1 %.

Микросхема DD2 осуществляет преобразование уровней напряжений последовательного интерфейса RS232 связи контроллера с компьютером.

**Выводы**

1. Микропроцессорный генератор разверток электронного пучка в автономном режиме работы позволяет воспроизводить до 32 записанных в память разверток любой сложности.

2. При связи с компьютером по последовательному интерфейсу количество воспроизводимых разверток практически не ограничено. Замену воспроизводимой развертки на любую другую из компьютера можно осуществлять в процессе сварки, не прерывая процесс.

3. При проектировании развертки задается желаемое распределение плотности тока пучка в области нагрева и траектория перемещения этого пучка. По ним автоматически вычисляются программы изменения токов в отклоняющих катушках.

4. Выбор траектории перемещения электронного пучка позволяет влиять не только на результирующее распределение плотности мощности

луча, но и на гидродинамические процессы в сварочной ванне, особенно при низкой частоте сканирования.

1. Информационное письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 1984. — № 13: Прибор СУ-177 для управления лучом сварочных пушек / Ю. Г. Куцан, В. В. Гумовский, С. Я. Макарихин и др. — [3] с.
2. Информационное письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 1987. — № 39: Куцан Ю. Г., Гумовский В. В. Прибор СУ-229 для управления лучом. — [4] с.
3. Чубаров В. П. Контроль и регулирование подвижным воздействием. — М.: Энергия, 1976. — 196 с.
4. Электронно-лучевой отжиг сварных соединений / Г. А. Ильченко, Ю. В. Полоскин, В. И. Андреев, А. А. Бондаков // Материалы VII Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. — М., 1983. — С. 54–58.
5. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
6. Ланкин Ю. Н., Байштрук Е. Н. Генераторы разверток электронного пучка для сварки и термообработки // Автоматическое управление процессами сварки и нанесения покрытий: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — С. 106–110.

The microprocessor-based control system for scanning of the electron beam in electron beam welding, and software for graphic representation of the scans are described. The system makes it possible to realise the scans with an arbitrary resultant distribution of power density of the electron beam in the welding zone. Development of a scan comprises setting of a path and instantaneous power of the electron beam at each point, and representation of resultant distribution of the beam power density. The program of variations in deflecting coil currents is calculated automatically.

Поступила в редакцию 04.03.2009

ПРЕССОВАЯ СВАРКА С НАГРЕВОМ ДУГОЙ, УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Разработаны современные высокопроизводительные технологии и оборудование прессовой сварки с нагревом дугой, управляемой магнитным полем.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- ✓ производство деталей автомобильной промышленности (амортизаторы, карданные валы, пневматические пружины, рулевые тяги);
- ✓ сварка труб диаметром 20...219 мм с толщиной стенки 1.5...12 мм;
- ✓ сварка деталей различного назначения, в том числе со сплошным поперечным сечением.

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- ✓ процесс сварки происходит в автоматизированном режиме;
- ✓ высокая эффективность процесса сварки благодаря применению системы автоматического поддержания величины дугового зазора;
- ✓ высокое и стабильное качество сварных соединений;
- ✓ высокая производительность процесса сварки;
- ✓ отсутствие вспомогательных сварочных материалов;
- ✓ контроль параметров процесса в реальном времени.



Карданный вал (время сварки 2,9с)



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИНВЕРТОРОВ ТОКА

Г. Н. МОСКОВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы особенности работы инверторов тока. Получена функциональная зависимость длительности полупериода колебательного процесса инвертора тока от добротности контура. Выполненные аналитические расчеты тока инвертора представлены в графической форме в разных системах координат. Разработана новая методика расчета и рассчитаны новые частотно-временные характеристики инвертора тока.

Ключевые слова: инвертор тока, термообработка, комплексная частота, резонансная частота, угловая частота, добротность, колебательный контур, характеристическое сопротивление, длительность полупериода, рабочая частота, баланс мощности

В настоящее время инверторные источники питания все более широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе в области сварки и родственных технологий. Их преимущество заключается не только в уменьшении массогабаритных показателей и стоимости активных материалов источников питания, но и в существенном улучшении управляемости и качества технологических процессов.

Для термообработки сварных соединений и различных металлоконструкций индукционным нагревом в настоящее время широко используются инверторные источники питания с частотой преобразования 1...3 кГц и большой выходной мощностью, измеряемой десятками и сотнями киловольт-ампер. Несмотря на интенсивное развитие инверторной техники вопрос создания высококачественных и надежных источников питания для термообработки остается актуальным, что обусловлено требованиями, которые предъявляются к источникам питания (относительно большая мощность, продолжительность работы, условия эксплуатации).

Мощные инверторы для термообработки созданы преимущественно на основе инвертора параллельного типа (инвертора тока), базовая принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 1.

С целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик подобных преобразователей (особенно в плане повышения их управляемости и надежности), разработана схема нового мощного инвертора для термообработки, предназначенного для работы как в стационарных, так и полевых условиях. Предварительный анализ этой схемы показал ее превосходство над известными техническими решениями во многих аспектах. Однако при этом необходимо было вы-

полнить тщательный анализ происходящих переходных процессов. Имеющиеся в научно-технической литературе расчеты подобных инверторов дают только общую характеристику электромагнитных процессов в инверторах и не пригодны для разработки математически обоснованных алгоритмов управления ими. Для успешного решения поставленной задачи создана новая методика расчета таких инверторов с математически точными уравнениями тока и напряжения во всех элементах инвертора. При этом пришлось решить несколько проблем.

Первая была связана с рациональным выбором элементарных функций, описывающих переходные процессы в схеме инверторного источника питания. Она возникла в связи с тем, что в некоторых публикациях для описания переходных процессов в инверторах широко используются гиперболические тригонометрические функции — преимущественно синусы и косинусы [1, 2]. В то же время уже в первых вариантах полученных автором выражений для тока и напряжения в цепях инвертора гиперболические функции полностью отсутствуют. В известном учебнике по электротехнике [3] имеется определенное математическое доказательство нецелесообразности и

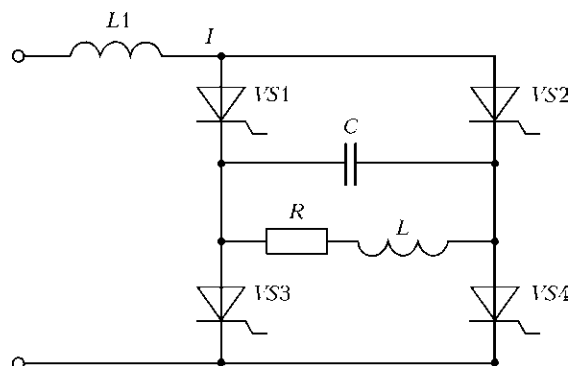


Рис. 1. Схема инвертора тока: I — ток выпрямителя; $VS1...VS4$ — тиристоры; R — сопротивление нагрузки; C — емкость конденсатора; L — эквивалентная индуктивность колебательного контура; $L1$ — индуктивность дросселя выпрямителя, питающего инвертор



даже ошибочности применения этих функций для описания колебательных процессов в RLC -цепях. Гиперболические синусы или косинусы появляются в уравнениях, описывающих аperiodические процессы. Для математического описания периодических колебательных процессов необходимо использовать периодические функции, которыми и являются обыкновенные тригонометрические синусы и косинусы. Тем более, что они почти автоматически появляются при решении дифференциальных уравнений, если при этом использовать формулы Эйлера. В дальнейшем автор строго придерживался классического решения составленных дифференциальных уравнений без использования гиперболических функций [4].

Вторая проблема связана с выбором оптимального метода решения исходных дифференциальных уравнений. Для напряжения u_c на конденсаторе окончательное дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = \frac{RI}{LC}. \quad (1)$$

Как видно из (1), характеристическое уравнение в нашем случае ничем не отличается от характеристического уравнения для последовательного инвертора. Однако другие начальные условия в инверторе тока значительно усложняют решение этого уравнения. Автор пришел к выводу о необходимости вернуться к истоку получения описанных в литературе готовых математических выражений. Все решения исходных дифференциальных уравнений выполнены с использованием комплексных частот собственных колебаний, а их дальнейшие преобразования выполнялись в комплексной форме.

Только на завершающем этапе был осуществлен переход от полученных выражений в комплексной форме к привычным для нас экспоненциальным и тригонометрическим функциям. С этой целью использовали четыре наиболее типичные и часто встречающиеся комплексные функции, которые представляют собой математическое сочетание корней характеристического уравнения и их экспоненциальных функций. При отсутствии ошибок окончательный переход от комплексных функций к элементарным функциям осуществляется при полном исчезновении мнимых чисел, что было использовано как важнейший критерий правильности решения исходных дифференциальных уравнений.

Третья проблема связана с преобразованием полученных выражений до наглядного и показательного уровня, пригодного для дальнейшего практического применения. С целью упрощения полученных выражений традиционно введена новая переменная — фазовый угол $\theta = \omega t$, где ω —

угловая (круговая) частота колебательного контура с учетом затухания; t — реальное время. Полученные выражения удалось также несколько упростить путем введения в них добротности колебательного контура инвертора Q в качестве второй переменной. Все токи и напряжения колебательного контура были выражены в относительных единицах.

В качестве базовых единичных приняты следующие значения: $I = 1$ — ток источника, питающего инвертор; $r = 1$ — характеристическое сопротивление колебательного контура. В качестве единичных значений напряжения и мощности приняты соответственно следующие значения: $U = Ir = 1$ и $P = I^2 r = 1$. Таким образом, ток и напряжение в цепях инвертора представлены в относительных единицах как функции двух переменных — фазового угла θ и добротности колебательного контура Q .

В связи с отсутствием точной методики расчета даже таких упрощенных схем инверторов тока (см. рис. 1) было решено не учитывать на этом этапе реальные свойства тиристорных коммутаций считать равным нулю. С целью выяснения естественных свойств инвертора тока принятие в расчетах мгновенной коммутации тиристорных оправдано и даже необходимо.

При изменении времени t от 0 до $T/2$ (где T — период установившихся колебаний инвертора тока при нагрузке) фазовый угол θ изменяется от нуля до θ_m . Другими словами, параметр θ_m представляет собой полупериод колебательного процесса инвертора, выраженный в радианах. Обычно в электротехнических цепях переменного тока и различных колебательных контурах полупериод колебательного процесса в радианах всегда равен π . Однако несмотря на тщательную проверку правильности дифференциальных уравнений, анализ первых полученных результатов их решения показал, что если считать $\theta_m = \pi$, то стыковка начальных и конечных условий и завершение расчета становятся невозможными. Чаще всего это происходит при несоответствии принимаемых математических условий реальным физическим процессам. В связи с этим принято решение считать параметр θ_m величиной неизвестной, которая зависит от других параметров инвертора и ее следует определить. После чего стыковка начальных и конечных условий и получение искомого решения особых трудностей не вызывали, что также является своеобразным критерием правильности промежуточных расчетов. В ходе дальнейших преобразований получено трансцендентное уравнение, устанавливающее функциональную связь между значениями θ_m и Q :



$$\frac{\operatorname{tg} \theta_m}{\sqrt{4Q^2 - 1}} + \frac{1 + \left(\cos \theta_m + \frac{\sin \theta_m}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \right) e^{-\theta_m / (\sqrt{4Q^2 - 1})}}{1 + \left(-\cos \theta_m + \sqrt{4Q^2 - 1} \sin \theta_m \right) e^{-\theta_m / (\sqrt{4Q^2 - 1})}} = 0. \quad (2)$$

С целью однозначного определения параметра θ_m как функции добротности Q отработана простая и эффективная методика компьютерного решения полученного трансцендентного уравнения. Для проверки правильности компьютерного расчета параметра θ_m некоторые контрольные точки были определены методом последовательных приближений на программируемом микрокалькуляторе. На основании полученной зависимости $\theta_m(Q)$ выполнены дальнейшие преобразования с целью получения приемлемых выражений токов и напряжений в цепях инвертора. Необходимо подчеркнуть, что на всех этапах осуществлялись чисто математические преобразования и упрощения, а не пренебрежение теми или иными величинами, например, в силу их малости. Кроме того, на всех этапах выполняли дополнительную проверку получаемых выражений путем введения в них бесконечной добротности и преобразования их в простые и наглядные уравнения для идеального колебательного контура. В результате получены математически точные уравнения, описывающие изменения токов и напряжений в цепях инвертора. Проверку окончательных выражений для токов и напряжений методом расчета баланса мощностей выполняли на компьютере в программе MathCAD, при этом получено полное равенство входной мощности, потребляемой от источника тока и выделяющейся в нагрузке. Это подтверждает достоверность полученных аналитических зависимостей, а также правильность всех выполненных расчетов. Кстати, автор не нашел работ по инверторам, где бы выражения для тока и напряжения, содержащие гиперболические синусы и косинусы, проверялись методом расчета баланса мощностей. Вероятно, применение некоторыми исследователями гиперболических синусов и косинусов для описания колебательного процесса в инверторах тока может быть объяснено тем, что длительность полупериода колебаний в радианах ошибочно считалась величиной постоянной, всегда равной π , в то время как существует определенная математическая зависимость этой длительности от добротности контура. Таким образом, сделанный ранее вывод о некорректности применения гиперболических синусов и косинусов для описания колебательного процесса нашел еще одно своеобразное математическое подтверждение.

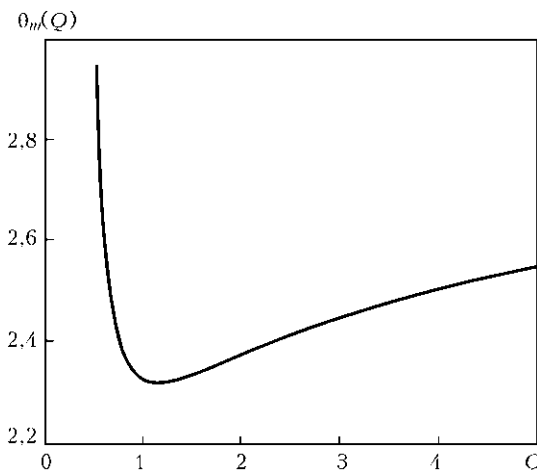


Рис. 2. Зависимость длительности полупериода колебаний в инверторе тока θ_m от добротности Q

Рассмотрим некоторые результаты выполненных исследований. Анализ зависимости $\theta_m(Q)$, представленной на рис. 2, показал, что при увеличении добротности колебательного контура выше минимального критического значения ($Q > 0,5$) длительность полупериода колебаний в радианах резко уменьшается, а при $Q_2 = 1,124$ достигает минимального значения $\theta_{\min} = \theta_m(Q_2) = 2,319$. При дальнейшем увеличении добротности значения исследуемой величины $\theta_m(Q)$ монотонно возрастают и при $Q \rightarrow \infty \theta_m(Q) \rightarrow \pi$, что и следовало ожидать. Ниже приведено также несколько числовых значений параметра $\theta_m(Q)$:

Q	1	2	4	10	50	200	1000	10000	100000
$\theta_m(Q)$	2,323	2,375	2,505	2,683	2,911	3,021	3,086	3,124	3,136

Таким образом, установлена важнейшая характеристика параллельного колебательного контура в составе инвертора тока — длительность полупериода колебательного процесса в радианах зависит от добротности контура и изменяется в пределах $\theta_{\min} \leq \theta_m(Q) \leq \pi$.

Отсюда возникает вопрос: почему в параллельных колебательных контурах инвертора тока длительность полупериода колебательного процесса $\theta_m(Q)$ всегда меньше π и выражается довольно сложной математической зависимостью от добротности, в то время как в последовательных колебательных контурах инвертора напряжения этот полупериод от добротности не зависит и всегда равен π ? И это при том, что угловая частота $\omega(Q)$ в обоих случаях определяется одной и той же зависимостью

$$\omega(Q) = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (3)$$

Этому есть определенное физическое объяснение. В последовательном колебательном кон-



туре ток изменяется по известному закону экспоненциально затухающей синусоидальной функции и угловая длительность полупериода колебаний в радианах независимо от степени затухания всегда равна π . Подключение источника постоянного напряжения к последовательному колебательному контуру не вносит качественных изменений в характер протекания переходного процесса. Он остается таким же, как и при разряде конденсатора на активно-индуктивную нагрузку.

В рассматриваемой схеме инвертора тока наблюдается совершенно иная картина. Подключение источника тока к параллельному колебательному контуру вызывает качественные изменения в характере протекания переходного процесса и происходит уменьшение (укорочение) длительности полупериода колебаний до определенного значения $\theta_m(Q)$. Таким образом, полученное выражение $\theta_m(Q)$ отображает не только свойства самого параллельного колебательного контура, но и внешней схемы его включения, определяющей характер поступления энергии в этот контур от источника тока.

С помощью метода комплексных амплитуд рассмотрим уменьшение длительности полупериода колебаний инвертора тока. При этом электрический ток в нагрузке может быть представлен в виде вектора, вращающегося против часовой стрелки с некоторой угловой скоростью. Действительное мгновенное значение тока равно проекции этого вектора на вещественную ось в определенный момент времени. В идеальном колебательном контуре без потерь скорость вращения вектора тока определяется угловой резонансной частотой ω_0 . При конечной добротности колебательного контура, т. е. наличии потерь, скорость вращения вектора тока уменьшается и определяется угловой частотой $\omega(Q)$ по уравнению (3). При неизменной добротности колебательного контура угловая скорость $\omega(Q)$ вращения вектора тока остается постоянной, однако амплитуда этого вектора изменяется во времени. Характер этого изменения определяется двумя факторами. Вследствие потерь энергии в нагрузке происходит уменьшение (затухание) амплитуды вектора тока. Однако вследствие поступления энергии в колебательный контур от источника тока амплитуда вращающегося вектора возрастает. В начале полупериода при $\theta = 0$ вектор тока располагается на вещественной оси и его проекция на эту ось равна его амплитуде. К моменту окончания полупериода угол поворота вектора тока составляет $\theta_m(Q)$ рад, однако его амплитуда в итоге увеличивается так, что его проекция на вещественную ось равна начальной амплитуде вектора тока, взятой с противоположным знаком. Проекция вектора тока на вещественную ось в конце полупе-

риода принимается за новый вектор тока в начале следующего полупериода после очередной коммутации тиристорov. Новый вектор тока начинает свой этап поворота на угол $\theta_m(Q)$. Таким образом, исследуемый процесс не может быть описан с помощью вектора тока, непрерывно вращающегося с угловой частотой $\omega(Q)$. Имеются отдельные периодически повторяющиеся угловые секторы $\theta_m(Q)$, в пределах которых вектор тока вращается с постоянной угловой скоростью $\omega(Q)$. Переход из одного сектора в другой (при коммутации тиристорov) сопровождается скачкообразным изменением амплитуды и фазы вектора тока.

В своем измерении параметр $\theta_m(Q)$ непосредственно связан с угловой частотой $\omega(Q)$, которая появляется при решении дифференциальных уравнений с применением комплексных частот собственных колебаний. Применяемый математический метод исследования колебательных процессов фактически предлагает нам полярную систему координат, в которой исследуемый вектор тока вращается с постоянной угловой частотой $\omega(Q)$, определяемой только параметрами колебательного контура. Все изменения колебательного процесса, вызываемые в течение одного полупериода активными потерями энергии (затуханием), а также подачей энергии в колебательный контур, могут отразиться только на амплитуде этого вращающегося вектора тока. Значение $\theta_m(Q)$, рассматриваемое нами как полупериод колебательного процесса, оказывается меньше π , поскольку оно определяется свойствами всего инвертора в целом, а фактически измеряется в первоначальных полярных координатах, заданных параметрами только колебательного контура. Принято считать, что период вращения любого вектора равен 2π , где 2π — радианная мера окружности. В нашем случае период $2\theta_m(Q)$ не равен 2π . Мы уже объяснили причину возникновения этого неравенства тем, что при коммутации тиристорov в инверторе тока нет непрерывного вращения вектора, а есть периодические повороты вектора на определенный угол $\theta_m(Q)$ с последующим изменением начальных условий. Это кажущееся противоречие может быть устранено, если перейти в другую полярную систему координат, где новый вектор тока непрерывно вращается с некоторой увеличенной эквивалентной угловой частотой ω_e и период его вращения составляет 2π . Тогда истинное значение периода установившихся колебаний инвертора тока в секундах может быть определено общеизвестной зависимостью $T = 2\pi/\omega_e$. Непосредственное численное определение ω_e представляет значительные трудности. Далее будет показано, как с помощью углового параметра



$\theta_m(Q)$ можно легко вычислить новую эквивалентную угловую частоту ω_e инвертора тока.

Таким образом, получена математическая зависимость полупериода инвертора тока $\theta_m(Q)$, которая однозначно определяется только добротностью своего колебательного контура. Значение $\theta_m(Q)$ не зависит от тока, питающего инвертор, но, тем не менее, оно одновременно отражает те качественные изменения, которые произошли в колебательном контуре под воздействием источника тока. Поэтому определенное значение длительности $\theta_m(Q)$ полупериода колебательного процесса является новым важнейшим характеристическим параметром инвертора тока, своеобразным ключевым элементом к его дальнейшим аналитическим расчетам. Значение $\theta_m(Q)$ позволяет получить точные математические уравнения токов и напряжений во всех контурах инвертора тока, рассчитать необходимые истинные частотно-временные и энергетические параметры, естественные внешние характеристики, а также разработать оптимальные алгоритмы управления инвертором тока.

На рис. 3 представлена зависимость тока в нагрузке $i(\theta, Q)$ от фазового угла θ в течение одного полупериода при добротности контура $Q = 2$, при этом длительность периода тока $2\theta_m(2) = 4,75$, что значительно меньше 2π .

Разделив $i(\theta, Q)$ на $\cos \theta$, получим выражение $A(\theta, Q) = i(\theta, Q)/\cos \theta$ для определения амплитуды вращающегося вектора тока, с помощью которого описывается колебательный процесс исследуемого инвертора согласно методу комплексных амплитуд. Полученная зависимость $A(\theta, Q)$ представлена на рис. 4 в полярных координатах и графически иллюстрирует переходный процесс в инверторе тока. Можно отметить сложный закон изменения амплитуды вектора тока в течение полупериода. После очередной коммутации тиристоров действительное значение тока $A3$ в нагрузке принимается за его начальное значение и начинается следующий полупериод колебательного процесса инвертора. При этом вектор $A3$ повернется на угол $\theta_m(Q)$ и превратится в вектор $A4$, проекция которого на действительную ось равна $A1$. Очевидно, что $A4 = -A2$. На этом заканчивается полный период колебательного процесса инвертора тока.

Перейдем к расчету новых частотно-временных параметров инвертора тока. Поскольку $\theta_m(Q) = \omega(Q)T(Q)/2$, получим формулу для определения истинного периода установившихся колебаний инвертора тока в секундах

$$T(Q) = \frac{2\theta_m(Q)}{\omega(Q)}. \quad (4)$$

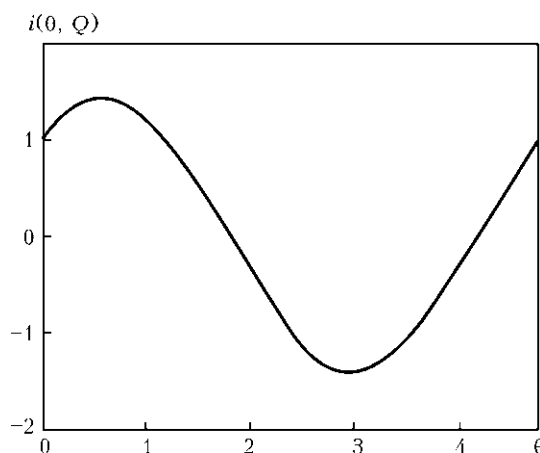


Рис. 3. Зависимость тока в нагрузке $i(\theta, Q)$ от фазового угла θ при добротности контура $Q = 2$

Легко доказать, что при $Q = \infty$ (т. е. для идеального колебательного контура без потерь) формула (4) дает известное выражение $T(\infty) = 2\pi/\omega_0 = T_0$. Из этой формулы получим выражение для определения новой эквивалентной угловой частоты $\omega_e(Q) = 2\pi/T(Q)$ как функциональной зависимости от добротности:

$$\omega_e(Q) = \omega(Q) \frac{\pi}{\theta_m(Q)} = \omega_0 \frac{\pi}{\theta_m(Q)} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (5)$$

В новой системе координат вектор тока вращается непрерывно с угловой скоростью ω_e и его фазовый угол изменяется со временем по формуле $\theta_e = \omega_e t = \theta/k$, где $k = \theta_m(Q)/\pi$; $\theta = \omega t$ — фазовый угол в прежней системе координат. Новая зависимость тока в нагрузке $i_e(\theta_e, Q)$ от фазового угла θ_e может быть получена из представленной на рис. 3

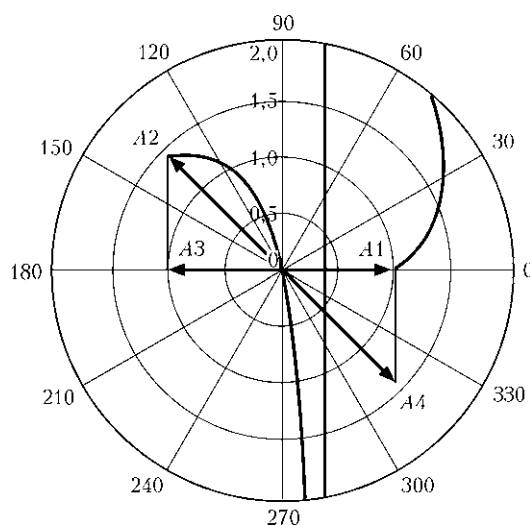


Рис. 4. Зависимость амплитуды вращающегося вектора тока $A(\theta, Q)$ от фазового угла θ при добротности $Q = 2$: $A1$ — начальное положение вектора тока; $A2$ — конечное положение вектора тока после его поворота на угол $\theta_m(Q)$ и соответствующего изменения амплитуды; $A3$ — проекция вектора $A2$ на действительную ось ($A3 = -A1$)

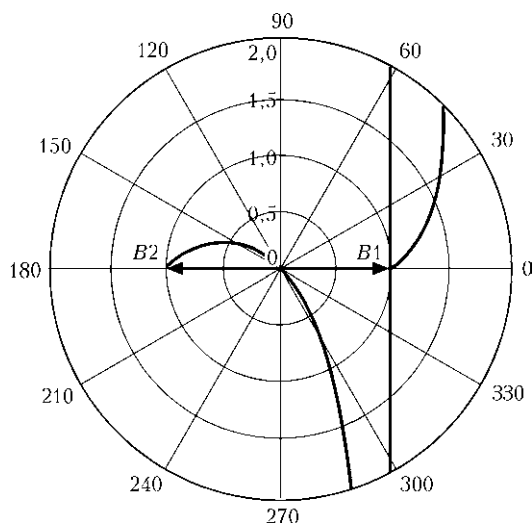


Рис. 5. Зависимость амплитуды $B(\theta_e, Q)$ эквивалентного вектора тока от фазового угла θ_e при $Q = 2$: $B1, B2$ — положения вектора тока при $\theta_e = 0$ и $\theta_e = \pi$, т. е. в моменты коммутации тиристоров (при этом $B1 = -B2$)

зависимости $i(\theta, Q)$, если вместо угла θ подставить $\theta_e k$. Форма тока при этом не изменится, а период тока $i_e(\theta_e, Q)$ в радианах будет равен 2π . Зависимость амплитуды $B(\theta_e, Q) = i_e(\theta_e, Q)/\cos(\theta_e)$ непрерывно вращающегося вектора тока от угла θ_e в новой системе координат для сравнения представлена на рис. 5.

В новой системе координат приведены результаты аналитических расчетов приведены к традиционному представлению о том, что период колебательного процесса в радианах равен 2π . Для этого пришлось покинуть первоначальную систему координат, которая определяется непосредственно параметрами колебательного контура и лежит в основе всех выполненных расчетов. В этой первоначальной системе координат период колебательного процесса в исследуемом инверторе тока не равен 2π . Таким образом, выполненные автором исследования не опровергают, а лишь дополняют и уточняют широко известные основополагающие классические знания по этому вопросу.

Реальная частота установившихся колебаний инвертора тока составляет

$$f(Q) = 1/T(Q) = \omega(Q)/2\theta_m(Q). \quad (6)$$

Относительная частота установившихся колебаний инвертора тока $f_1(Q) = f(Q)/f_0 = \omega_e(Q)/\omega_0$ может быть представлена следующим образом:

$$f_1(Q) = \frac{\pi}{\theta_m(Q)} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (7)$$

Зависимость $f_1(Q)$ рассчитана и показана на рис. 6. Для сравнения на этом же рисунке представлена зависимость относительной частоты ко-

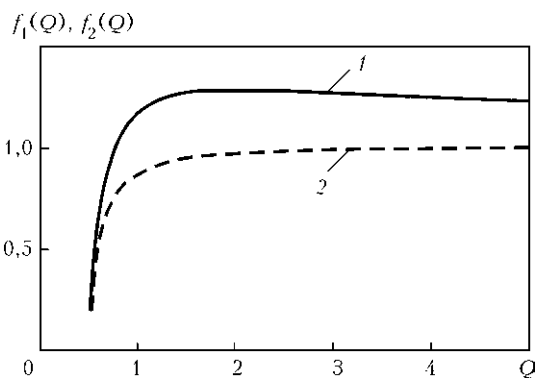


Рис. 6. Зависимости относительной частоты колебаний инверторов тока $f_1(Q)$ (1) и напряжения $f_2(Q)$ (2) от добротности Q

лебаний от добротности для последовательного колебательного контура

$$f_2(Q) = \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}.$$

Как видно из рис. 6, обе зависимости при $Q \rightarrow \infty$ асимптотически приближаются к единице, однако $f_2(Q)$ приближается к ней снизу, а $f_1(Q)$ — сверху. Причем, всегда $f_1(Q) > f_2(Q)$. Это свидетельствует о том, что увеличение частоты инвертора тока вследствие уменьшения длительности полупериода колебательного процесса доминирует над уменьшением этой частоты вследствие затухания. Таким образом, при анализе и расчете инверторов тока определенная зависимость $\theta_m(Q)$ имеет не только важное качественное, но и количественное значение, поскольку позволяет существенно повысить точность расчетов всех необходимых частотно-временных и энергетических параметров.

Известно, что если добротность колебательного контура меньше критического значения $Q_0 = 0,5$, то колебательный процесс переходит в апериодический процесс. Зависимость $f_1(Q)$ дает дополнительные характеристические значения добротности параллельного колебательного контура инвертора тока, на которые следует обратить внимание.

Так, $Q_1 = 0,766$ представляет собой добротность колебательного контура инвертора тока, при которой относительная частота инвертирования $f_1(Q_1) = 1$, т. е. частота тока в колебательном контуре несмотря на наличие потерь равна резонансной частоте колебаний идеального контура без потерь. Значение $Q_1 = 0,766$ может быть принято за минимально возможное значение рабочей добротности. Однако номинальное значение добротности следует выбирать больше ($Q_2 = 1,124$), особенно при нестабильной нагрузке. Это необходимо для того, чтобы даже при максимальном увеличении сопротивления нагрузки, например, вследствие переходных процессов, минимальное



значение добротности не опустилось ниже Q_1 . В противном случае при $Q < Q_1$ происходит резкое снижение частоты работы инвертора, что может вызвать или нарушение самого технологического процесса, или дальнейшее снижение добротности до критического значения $Q = 0,5$ и полного нарушения устойчивого цикла инвертирования. Диапазон добротностей $Q_1 < Q < Q_2$ можно рассматривать как разделительный участок между устойчивым ($Q > Q_2$) и недостаточно устойчивым ($Q < Q_1$) режимами инвертирования.

Величина $Q_M = 2$ является еще одним определенным характеристическим значением добротности параллельного колебательного контура в составе инвертора тока, при котором обеспечивается максимальная относительная частота колебательного процесса $f_M = f_1(Q_M) = 1,28$. Если характеристическое сопротивление колебательного контура $\rho = (L/C)^{0,5}$ остается неизменным, то при $Q_M = 2$ можно определить значение сопротивления нагрузки, при которой достигается максимальная относительная частота работы инвертора:

$$R_M = \rho/Q_M \quad (8)$$

Согласование любого значения реального сопротивления нагрузки с расчетным ее значением R_M осуществляется с помощью высокочастотного силового трансформатора.

Таким образом, полученные зависимости $\theta_m(Q)$ и $f_1(Q)$ позволяют произвести оптимальный выбор добротности инвертора тока. Значения добротности свыше 50 обычно характерны для радиотехнических контуров, в связи с этим они не рассматриваются нами, хотя полученные зависимости остаются справедливыми для всех добротностей. Для сварочных и других мощных промышленных инверторов тока желательно иметь минимальные значения добротности с целью снижения мощности силовых элементов схемы. Однако при колебаниях сопротивления нагрузки схема должна иметь определенный запас по устойчивости колебательного процесса. Полученная зависимость $f_1(Q)$ дает математически обоснованный выбор диапазона рабочих добротностей Q_w инверторов тока:

$$1,5 < Q_w < 3. \quad (9)$$

Характерной особенностью этого диапазона добротностей является незначительное изменение рабочей частоты инвертора. В этом же диапазоне находится характеристическое значение добротности $Q_M = 2$ инвертора тока, при которой относительное увеличение частоты инвертора максимальное. Отклонения сопротивления нагрузки от значения R_M в определенных пределах изме-

нения добротности ($1,5 < Q < 3,0$) не приводят к существенным изменениям частоты инвертирования. Для постоянных стабильных нагрузок рабочая добротность может быть меньше 1,5 и приближаться к Q_2 .

Результаты расчета и анализа для сравнения частотно-временных свойств параллельного и последовательного инверторов сведены в таблицу. Как видно из данных таблицы, первые три параметра инвертора тока и инвертора напряжения вычисляются совершенно одинаково. Их появление обусловлено общепринятым математическим методом решения исходных дифференциальных уравнений с использованием комплексных частот собственных колебаний. В трех последних параметрах длительность полупериода колебательного процесса, выраженная в радианах и равная числу π для последовательного колебательного контура инвертора напряжения, заменена сложной математической зависимостью $\theta_m(Q)$, рассчитанной автором для параллельного колебательного контура инвертора тока. С ее помощью осуществляется переход к реальным частотно-временным параметрам инвертора тока.

Таким образом, полученные зависимости помогают глубже проникнуть в самую суть происходящих физических явлений в схеме инвертора тока, осуществить правильный выбор и расчет силовой части инвертора и его элементов. На основании этих зависимостей легко выработать обоснованные алгоритмы управления тиристорами инвертора, причем как при его запуске, так и в процессе работы при формировании требуемых внешних характеристик, что не противоречит естественному ходу переходных процессов в элементах инвертора.

На основе установленной и определенной функциональной зависимости $\theta_m(Q)$ разработаны точные аналитические выражения тока, напряжения и мощности. Это позволило раскрыть более полно

Сравнительные параметры параллельного и последовательного инверторов

Параметр	Инвертор тока	Инвертор напряжения
ω_0	$2\pi f_0$	$2\pi f_0$
$\frac{\omega(Q)}{\omega_0}$	$\sqrt{1 - 1/4Q^2}$	$\sqrt{1 - 1/4Q^2}$
T_0	$\frac{2\pi}{\omega_0}$	$\frac{2\pi}{\omega_0}$
θ_m	$\theta_m(Q)$	π
$T(Q)$	$\frac{2\theta_m(Q)}{\omega(Q)}$	$\frac{2\pi}{\omega(Q)}$
$\frac{f(Q)}{f_0}$	$\frac{\pi}{\theta_m(Q)} \sqrt{1 - 1/4Q^2}$	$\sqrt{1 - 1/4Q^2}$



энергетические параметры инвертора тока, построить его естественные внешние характеристики. Более подробный анализ этих вопросов автор планирует изложить в своей следующей работе.

Выводы

1. Полученная функциональная зависимость длительности полупериода рабочей частоты $\theta_m(Q)$ от добротности контура Q является ключевым элементом к расчету всех параметров инвертора тока.

2. Предложенная новая методика расчета инверторов тока позволяет получить необходимые частотно-временные параметры, а также точные аналитические выражения для тока и напряжения, правильность и достоверность которых подтверждается методом расчета баланса мощности.

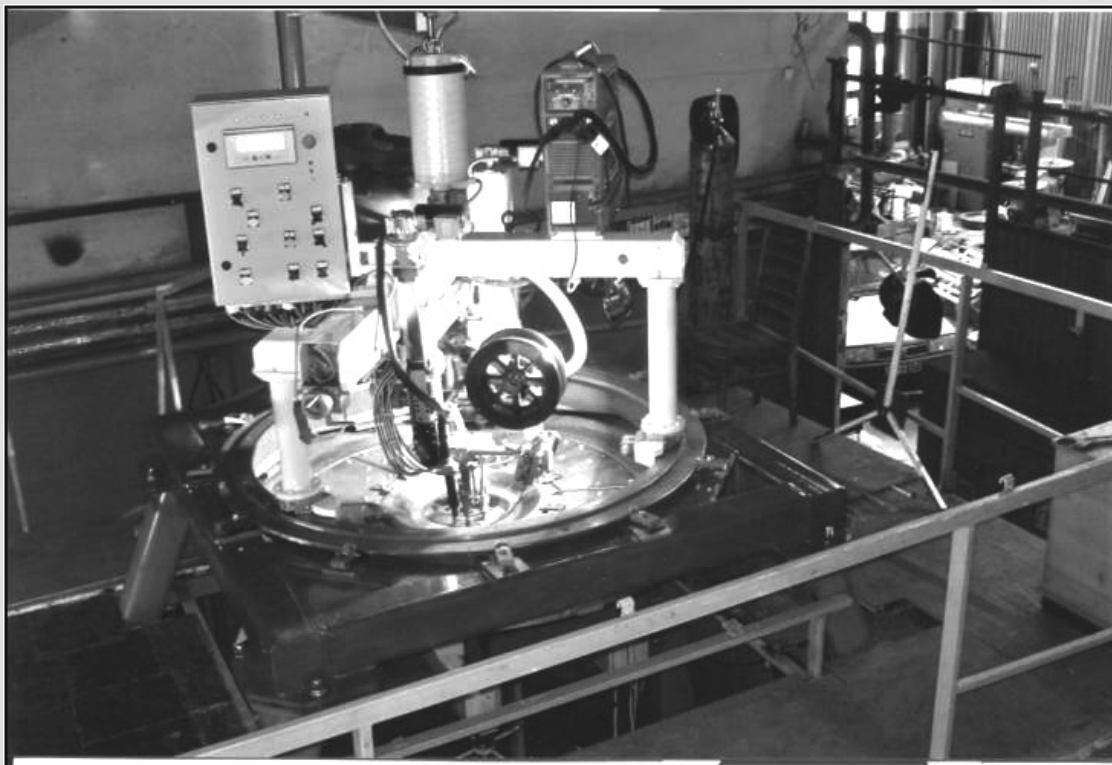
3. Выявленные отличительные особенности работы параллельного колебательного контура в составе инвертора тока дают возможность предложить и рассчитать его новые характеристические параметры.

1. *Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок* / Е. И. Беркович, Г. В. Ивенский, Ю. С. Иоффе и др. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 208 с.
2. *Бальян Р. Х., Сиверс М. А.* Тиристорные генераторы и инверторы. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 223 с.
3. *Матханов П. Н.* Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 1981. — 333 с.
4. *Москович Г. Н.* Разработка нового мощного инвертора для термообработки: Тез. докл. науч.-практ. семинара «Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике», г. Киев, 12–15 окт., 2004 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2004. — С. 15–17.

Features of current inverter operation are studied. Functional dependence of the duration of half-period (in radians) of the current inverter oscillatory process on tuned-circuit Q -factor was derived. Performed analytical calculations of inverter current are presented in the graphic form in different systems of coordinates. A new design procedure was developed and new frequency-time characteristics of current inverters were calculated.

Поступила в редакцию 21.01.2009

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БЕЗДЕФОРМАЦИОННОЙ СВАРКИ КРУГОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ



Автоматизированная установка для аргонодуговой сварки круговых швов с применением предварительного упругого изгиба и фрезерования кромки отверстия под фланец



50 ЛЕТ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описан 50-летний опыт работ Института электросварки им. Е. О. Патона по созданию технологий электронно-лучевой сварки материалов и изделий с толщиной кромок до 200 мм, совершенствованию энергетических блоков и изготовлению серии промышленных установок с программным обеспечением.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, технологические разработки, энергетические блоки, промышленные установки, программное обеспечение

Изучение принципов построения оборудования и возможностей электронно-лучевой сварки (ЭЛС) началось в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины еще в 1958 г. по инициативе и при непосредственном участии академика Б. Е. Патона. Тогда же была создана первая лабораторная установка с вакуумной камерой небольших размеров, оснащенная диодной пушкой с прямонакальным катодом, и выполнена сварка различных небольших изделий. Уже через год результаты работ ИЭС им. Е. О. Патона оказались востребованными промышленностью и в первую очередь при производстве жидкостных реактивных двигателей. Возникла необходимость создания вакуумных камер, транспортировка которых к месту их эксплуатации была затруднена из-за их больших габаритов. В то же время потребители имели возможность изготовить вакуумную камеру собственными силами. Для этого требовалось лишь оснастить изготовленную камеру энергетическим блоком ЭЛС — сварочной пушкой, высоковольтным источником питания и системой управления. ИЭС им. Е. О. Патона в 1970-х годах на базе специализированного предприятия — Сумского завода электронных микроскопов и электроавтоматики (СЭЛМИ) — было организовано серийное производство разработанных институтом энергетических блоков для ЭЛС металлов преимущественно средней и большой толщины. На основании исходной технической документации ИЭС им. Е. О. Патона объединение СЭЛМИ разработало производственную документацию и изготовило в разное время 72 комплекта энергетических блоков СП-30 (25 кВ, 500 мА), 330 комплектов У-250А (30 кВ, 450 мА), 320 комплектов ЭЛА-60 (60 кВ, 250, 500 и 100 мА) и ЭЛА-120 (120 кВ, 100 мА).

ИЭС им. Е. О. Патона сохранил и развил свои научные и производственные возможности в области ЭЛС после распада Советского Союза и

привлек зарубежные заказы на изготовление промышленного оборудования «под ключ». Сейчас можно выделить четыре основных направления в деятельности отдела и инженерного центра ЭЛС ИЭС им. Е. О. Патона:

- разработка технологии и технологических приемов ЭЛС материалов и изделий с толщиной свариваемых кромок до 200 мм;
- совершенствование энергетических блоков;
- проектирование и изготовление в кооперации с партнерами промышленных установок для ЭЛС;
- разработка программного обеспечения установок для ЭЛС.

Рассмотрим наиболее значимые результаты работ по указанным направлениям за последние десять лет.

Технологические разработки. Ввиду все расширяющегося применения толстостенных конструкций из трудносвариваемых алюминиевых сплавов 7000-й серии выполнен цикл исследований свариваемости этих сплавов толщиной до 150 мм. Установлено, что в этом случае основным дефектом сварных соединений является сетка мелких горячих трещин в околошовной зоне. Для предотвращения появления этих трещин необходимо добиваться получения мелкозернистой структуры основного металла хотя бы в зоне термического влияния, например, за счет обработки свариваемых кромок на глубину 8...10 мм с помощью сварки трением с перемешиванием. Весьма эффективно также уменьшение ширины литой зоны и повышение стабильности формы шва, что обеспечивается за счет сварки наклонным пучком и его осцилляции. Высокая стабильность поддержания ускоряющего напряжения и подавление электрических пробоев позволили обеспечить бездефектное формирование шва на участке перекрытия кольцевого шва.

Применительно к изготовлению конструкций из алюминий-магниевого сплава отработана техника и технология ЭЛС металла толщиной 200 мм, которая успешно освоена двумя фирмами Южной Кореи.



Весьма эффективной оказалась разработанная технология одновременной ЭЛС трехпродольных швов на буровых долотах с использованием трех сварочных пушек. Эта технология позволяет существенно снизить остаточные сварочные деформации корпуса бурового долота и повысить производительность сварочного процесса, что подтверждено результатами промышленной эксплуатации изготовленных нами установок в США и России.

Разработана техника и технология ЭЛС, а также косметического заглаживания корневой части швов в труднодоступных местах с поворотной (90°) электромагнитной системой. Эта технология представляется особенно эффективной, в частности, при изготовлении высокочастотных ниобиевых резонаторов и авиационных пилонов.

Энергетические блоки. До недавнего времени ИЭС им. Е. О. Патона использовал в своих сварочных электронных пушках катоды из гексаборида лантана LaB_6 , относящиеся к классу высокоэффективных термокатодов с низким уровнем работы выхода электронов и соответственно низкими рабочими температурами (1800...1900 °С) и энергопотреблением.

Пока объемы применения ЭЛС при изготовлении изделий из титановых и жаропрочных никелевых сплавов были относительно небольшими, на производстве «мирились» со спадом эмиссионной способности гексаборидных катодов вследствие металлизации их эмитирующей поверхности парами тугоплавких составляющих свариваемых металлов.

Однако в последнее время проблема замены катодов из гексаборида лантана катодами с рабочей температурой не менее 2800 °С стала актуальной. Основная трудность применения высокотемпературных катодов состоит в обеспечении надежного закрепления катода в его держателе с минимальным отводом тепла. Использование штырей, которые введены в боковые отверстия массивных шайбовых катодов плавильных пушек, не могло быть реализовано для катодов диаметром несколько миллиметров, а приварка задней торцевой поверхности катода к держателю в виде шайбы (конструкция фирмы «Техмета») требовала значительной (до 300 В) мощности для нагрева катода.

Благодаря применению лазерной технологии нам удалось создать конструкцию крепления вольфрамового катода, при которой необходима значительно меньшая мощность нагрева. Так, для нагрева катода диаметром 3 мм, обеспечивающего формирование пучка с током до 500 мА, требуется мощность около 70 Вт, а при диаметре катода 4,2 мм, обеспечивающего формирование пучка с током до 1000 мА, — около 100 Вт. Такие катоды уже используются в нескольких промышленных установках.

На протяжении 40 лет в качестве линейного проходного элемента ИЭС им. Е. О. Патона применял в своих электронно-лучевых источниках питания электронную лампу. Это решение остается эффективным до настоящего времени и для источников питания мощностью 30...120 кВт. Источники питания мощностью до 18 кВт в последнее время создаются нами на базе высокочастотных резонансных генераторов, использующих мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы). Благодаря малой (до 1...2 Дж/кВт) запасенной энергии существенно затруднен переход искровых разрядов в ускоряющем промежутке в дуговые, что предотвращает срабатывание токовой защиты источника питания. Удельная объемная мощность (отношение общей мощности источника питания к единице его объема) превышает аналогичный показатель традиционных источников в 5...10 раз. К сожалению, мягкость внешней характеристики высокочастотных резонансных источников питания в зависимости от нагрузки не позволяет применять их в режиме импульсной модуляции тока пучка.

Необходимость в автономных энергетических блоках для ЭЛС с целью замены устаревших или изношенных энергоблоков, а также для комплектации самостоятельно изготовленных заказчиками вакуумных камер возникает достаточно часто. Стойки управления источника питания, где располагаются промышленный компьютер и система «РАСТР», для визуализации зоны сварки с помощью вторичных электронов выполняются либо как стойка прямого управления (оператор непосредственно с этой стойки создает и редактирует программы сварки), либо с удаленным управлением (задание и редактирование программ сварки осуществляется с пульта CNC установки для ЭЛС).

За последние десять лет нами введены в промышленную эксплуатацию 19 энергетических блоков мощностью от 1,2 до 60 кВт при ускоряющем напряжении 60 кВ и от 6 до 120 кВ при ускоряющем напряжении 120 кВ.

Промышленные установки. Отличительной особенностью разработанных ИЭС им. Е. О. Патона установок для ЭЛС крупногабаритных изделий, безусловно, является применение внутрикамерных электронных пушек, которые можно перемещать на расстояние до 12 м, что позволяет максимально повысить коэффициент использования внутреннего объема вакуумной камеры.

Благодаря наличию производственного помещения площадью 2000 м², оснащенного порталным краном грузоподъемностью 30 т, у нас есть возможность осуществлять сборку и отладку установок для ЭЛС с объемом вакуумных камер до 100 м³. Если габариты или масса вневакуумной камеры выходят за допустимые для транспортировки пределы, то вакуумную камеру разделяют



на несколько частей. Камеры изготавливают в виде двух вакуумноплотных, сравнительно тонкостенных оболочек (толщина каждой 8...12 мм), соединенных между собой ребрами жесткости — шпангоутами. По такому же принципу выполнены и двери камеры. Применение такой коробчатой конструкции стенок и дверей вместо обычной тавровой позволяет получить в 2 раза больший момент инерции и, как следствие, меньший прогиб стенки при откатке камеры.

В течение 1998–2008 гг. нами введены в промышленную эксплуатацию 27 комплектных установок для ЭЛС.

Программное обеспечение. Основным достижением в области программного управления процессом ЭЛС можно считать развитие так называемого визуального метода проектирования программ ЭЛС сложных конструкций.

Для управления электронно-лучевыми установками, как правило, используют распределенные компьютерные системы, которые включают связанные между собой интерфейсными шинами, но отдельно функционирующие устройства типа CNC и PLC. Обычно программы записываются в CNC в G-кодах и представляют собой последовательность блоков. В них для каждого отрезка пути задаются координаты точки, в которую необходимо переместиться, способ и параметры интерполяции при выполнении данного перемещения, значения тока сварки, фокусировки, технологической развертки и отклонения, а также скорость перемещения на данном отрезке.

В случае одновременного использования нескольких координат, когда итоговая траектория представляет собой сложную пространственную кривую, длительность подготовки программы может составлять в зависимости от сложности тра-

ектории от нескольких часов до нескольких дней или даже недель.

Поэтому, сохраняя мировую ориентацию систем, ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Институтом проблем математических машин и систем НАН Украины были разработаны встраиваемые в CNC-системы инструментальные программные средства, которые позволяют оператору пользоваться так называемым визуальным методом проектирования программ ЭЛС сложных конструкций. Дополнительно к традиционно применяемому вычислительному комплексу, объединяющему в своем составе CNC и PLC, введены более высокий уровень интерфейса оператора для визуального проектирования рабочих программ и контроля процесса сварки, а также дополнительный компьютер, который независимо от других процессорных узлов решает задачи распознавания стыка по получаемому от аппаратуры наблюдения «РАСТР» изображению поверхности изделия и совместно с главным компьютером обеспечивает выполнение функций автоматического обучения, корректировки и слежения за стыком. Спроектированная визуально программа ЭЛС при запуске на выполнение автоматически (без участия оператора) конвертируется в последовательность G-кодов, исполняемую CNC. В 2006 г. результаты этой работы отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники.

Отдел и инженерный центр ЭЛС поддерживают постоянные контакты с промышленными предприятиями и фирмами в Украине и за рубежом, участвуют в работе международных сварочных выставок, предоставляют консультации и аргументированные заключения, проводят обучение и стажировку специалистов, поддерживают свой сайт в Интернете.

The 50-years experience of the E. O. Paton Electric Welding Institute in development of the technologies for EBW of materials and parts with an edge thickness of up to 200 mm, upgrading of power units and manufacture of a series of commercial software-based machines is described.

Поступила в редакцию 28.01.2009



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРЕЗНЫХ ТРОЙНИКОВ ПРИ РЕМОНТЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. С. БУТ, канд. техн. наук, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,
О. И. ОЛЕЙНИК, инж. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние толщины стенок соединительных элементов, внутреннего давления во время установки и расстояния между кольцевыми швами, соединяющими тройник с трубопроводом, на геометрические размеры указанных швов. Построены номограммы для определения допустимого давления при гидравлических испытаниях полученных сварных узлов в зависимости от длины устанавливаемого тройника и жесткости трубопровода. Приведены примеры внедрения конструктивно-технологических решений.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, разрезные тройники, кольцевые сварные швы, внутреннее давление, гидравлические испытания, жесткость оболочек, внедрение технологических разработок

Безопасность эксплуатации магистральных трубопроводов и их надежная бесперебойная работа обеспечивается соответствующими мероприятиями как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных мероприятий большое значение в этом направлении имеет соответствующая организация периодической технической диагностики состояния элементов магистрального трубопровода и ремонта обнаруженных недопустимых дефектов. На территории Украины эксплуатируются около 42000 км магистральных трубопроводов. Согласно статистике при периодической диагностике состояния трубопроводов выявляется около 5000–6000 дефектов на каждые 100 км длины. Значительная часть обнаруженных дефектов является недопустимой и требует ремонта. Классический ремонт трубопровода, связанный с его остановкой, очисткой и заменой дефектных участков, требует больших расходов средств и сопровождается значительными экологическими нарушениями, поэтому во всем мире интенсивно развиваются методы ремонта трубопроводов без выведения их из эксплуатации. Для Украины такие методы имеют особенно важное значение, учитывая достаточно высокую концентрацию населения в зоне прокладки магистральных трубопроводов и их протяженность. Данной проблемой занимается целый ряд научных и производственных организаций страны, среди которых следует отметить Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Ивано-Франковский национальный тех-

нический университет нефти и газа, ДК «Укртрансгаз».

Одним из направлений развития ремонтных технологий является разработка конструктивно-технологических решений и оборудования, позволяющих присоединять отводы с целью подключения к основной магистрали новых потребителей или мелких месторождений, а также замены протяженных дефектных участков трубопровода без вывода его из эксплуатации за счет подключения временной магистрали (байпаса) на период выполнения ремонтных работ.

Конструктивно-технологические схемы. При замене дефектных участков (рис. 1) магистральных трубопроводов, как правило, используется байпас и четыре разрезных тройника. В случае подключения байпаса используются переход-

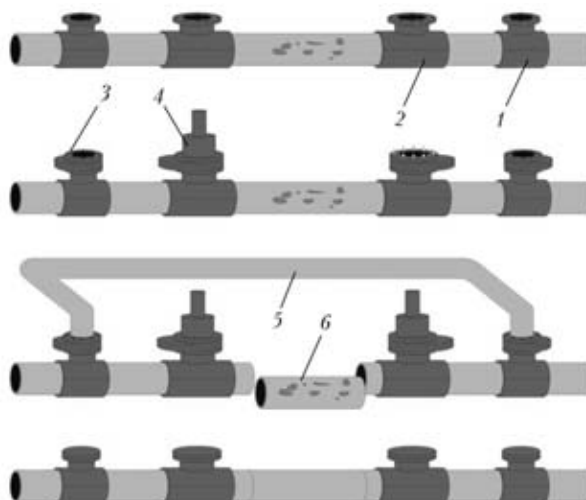


Рис. 1. Схема замены дефектных участков магистральных трубопроводов: 1, 2 — соответственно переходный и равнопроходный тройник; 3 — плоская заслонка; 4 — перекрывающее устройство; 5 — байпас; 6 — дефектный участок

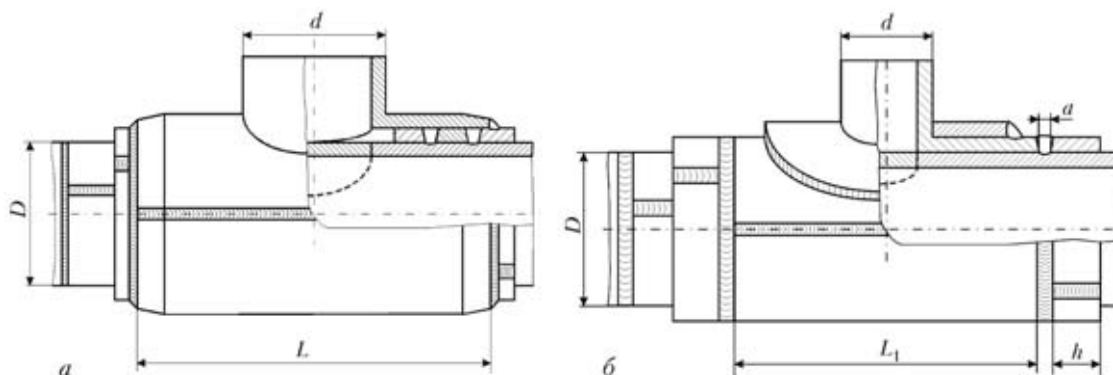


Рис. 2. Схемы разрезных тройников: а — равнопроходный; б — переходный (D и d — наружные диаметры соответственно трубы и отвода трубопровода; a — ширина зоны сплавления кольцевого шва с трубой; L — длина разрезного тройника; L_1 — расстояние между кольцевыми швами; h — ширина технологического кольца

ные тройники с соотношением диаметров $d/D \leq 0,7$, которые устанавливаются непосредственно на трубопровод с технологическими кольцами. Для установки перекрывающих устройств применяются равнопроходные тройники (соотношение $d/D = 1$), которые собираются на трубопроводе с промежуточными переходными технологическими кольцами. Их количество определяется в зависимости от геометрических параметров трубопровода. Схема установки таких разрезных тройников на трубопроводе с помощью сварки и их конструкции приведены на рис. 2.

В отличие от технологий, предлагаемых компаниями TDW и «British Gas», в данном случае разрезные тройники привариваются к трубопроводу под давлением с использованием нахлесточно-стыковых соединений [1], а не угловых. Это дает ряд преимуществ. Диапазон допустимых тепловложений при сварке нахлесточно-стыковых соединений имеет более широкие пределы, чем просто при наплавке или выполнении угловых швов, что в свою очередь позволяет регулировать параметры и свойства металла ЗТВ. В связи с этим повышается безопасность проведения сварочных работ на трубопроводе под давлением [2] и надежность полученных сварных соединений при эксплуатации. Экспериментально установлено, что для сварных соединений, выполненных по предложенной схеме, напряжения среза и сопротивление изгибу значительно выше, чем для традиционных соединений с угловыми швами.

Кроме того, переход от соединений с угловым швом к нахлесточно-стыковым повышает предел выносливости сварных узлов при повторно-статическом нагружении более чем на 50 %. Это объясняется снижением уровня напряжений в зоне сплавления шва со стенкой трубы за счет локального ограничения изгибных деформаций нагружаемого конструктивного элемента.

В Украине для отводов с соотношением диаметров $d/D \leq 0,5$ применяется схема подключения байпасных линий через сварной узел патрубко-

муфта (рис. 3). Такая схема запатентована в Украине и России. В состав конструкции входит разрезная муфта, в одной из частей которой вырезано отверстие под патрубок, который приваривается к трубопроводу через предварительно напавленный многослойный валик и соединяется с муфтой угловым швом.

Устанавливать сварной узел патрубок-муфта можно с целью подключения новых потребителей или мелких месторождений углеводородных продуктов к основной магистрали, а также для вырезки трещиноподобных дефектов в стенке трубопровода под давлением. Вырезка отверстия в трубопроводах, как правило, выполняется механическим способом с использованием корончатой фрезы через шаровой кран или плоскую задвижку [3].

Расчет кольцевых сварных швов. Сварные соединения разрезных тройников с трубопроводом в процессе эксплуатации испытывают различные по характеру нагрузки, обусловленные изменением внутреннего давления в трубопроводе, колебаниями температуры окружающей среды, сдвигами грунтов и т. п. При этом возникает потребность в определении необходимых и достаточных размеров несущей части кольцевых сварных швов (ширины зоны сплавления шва, который

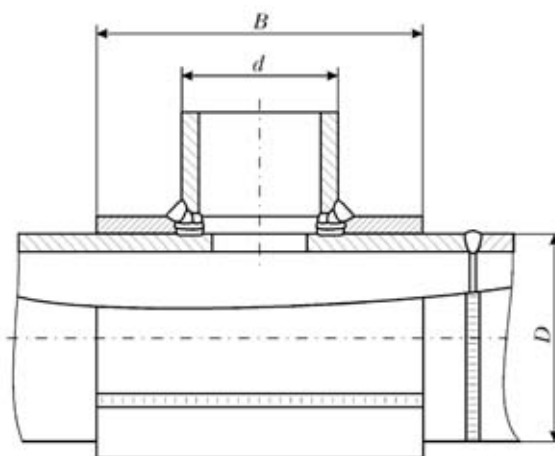


Рис. 3. Схема узла патрубок-муфта: B — ширина разрезной муфты



соединяет тройник с трубопроводом) для того, чтобы они имели возможность выдерживать все нагрузки во время эксплуатации трубопровода.

В работе [4] рассмотрено несколько сценариев установки разрезных тройников на трубопроводе под давлением и без него, а также разные условия выполнения отверстий в действующем трубопроводе. Кроме того, исследовано влияние конструктивного оформления сварных соединений тройников с трубопроводом (угловое и нахлесточно-стыковое) на предельные значения геометрических параметров сварных швов. Расчетами по определению несущей способности таких соединений было подтверждено преимущество предложенных нахлесточно-стыковых соединений.

В настоящей работе ставилась задача определить предельные геометрические размеры кольцевых швов в нахлесточно-стыковых сварных соединениях тройника с трубопроводом в зависимости от внутреннего давления при установке и последующем снижении давления до нуля.

Для определения необходимых размеров несущей части сварных швов в зависимости от разных исходных параметров и условий сварки использовали математический алгоритм, разработанный на основе критериев механики разру-

шения. Он дает возможность оценить и спрогнозировать работоспособность разных конструктивных схем, используемых для присоединения оболочечных элементов к трубопроводу, с учетом наличия естественного концентратора напряжений в виде межслойного зазора 2ρ (острой полости), которая образуется при установке оболочек на поверхность трубы и их сваривании кольцевыми швами.

Согласно работам [4, 5], предельное состояние сварных соединений при статической нагрузке определялось двухпараметрическим критерием хрупковязкого разрушения материала.

При решении упругопластической задачи по определению минимально допустимых указанных выше размеров сварных швов, согласно методике [4], были приняты следующие допущения: рассматривали осесимметричный случай; пренебрегли влиянием пластических деформаций вблизи вершины острой полости; не учитывали также напряжения, обусловленные термическим циклом сварки.

Для расчетов использовали следующие исходные данные: материал трубопровода — трубная сталь типа 17Г1С; модуль упругости $E =$

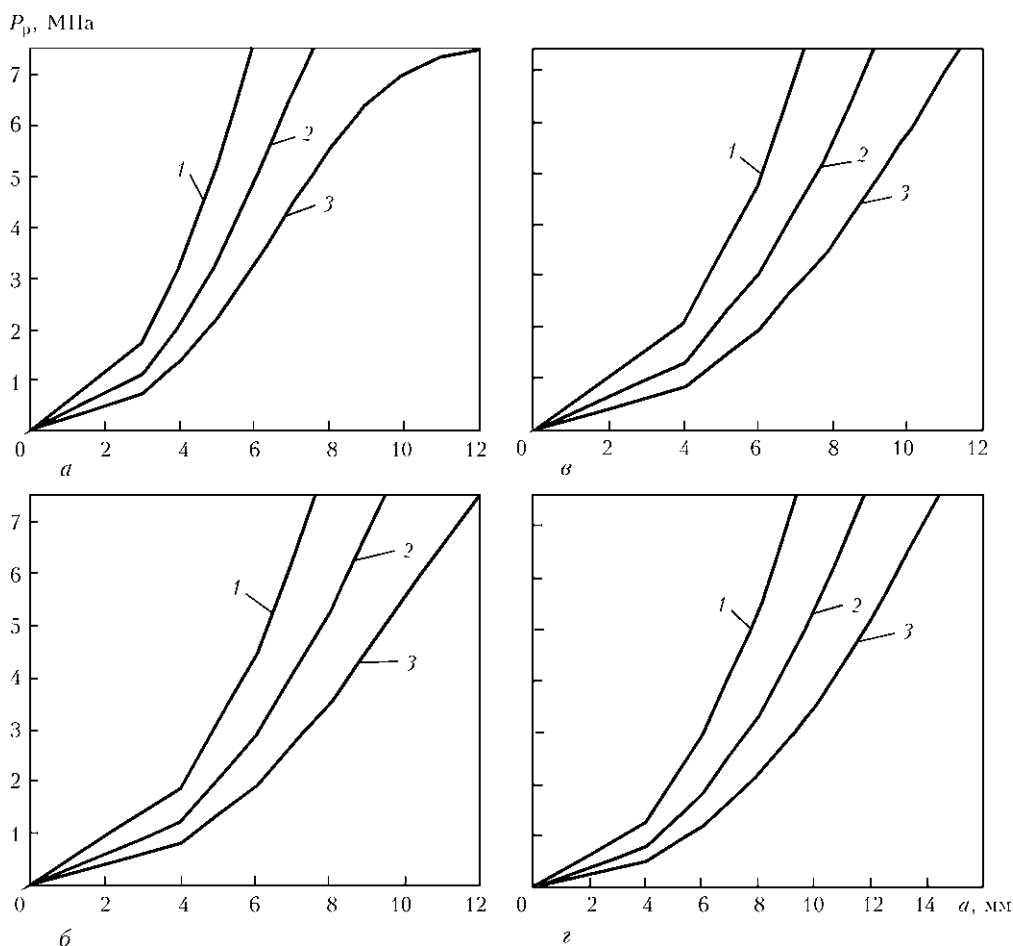


Рис. 4. Зависимость расчетной ширины зоны сплавления a кольцевого шва от внутреннего давления P_p в момент установки тройника: а, в — $t_2/t_1 = 1$; б, г — 2; а, б — $t_1 = 10$; в, г — 16 мм; 1 — Ду 700; 2 — Ду 1000 при $L_1 = 1000$ мм; 3 — Ду 1400 мм

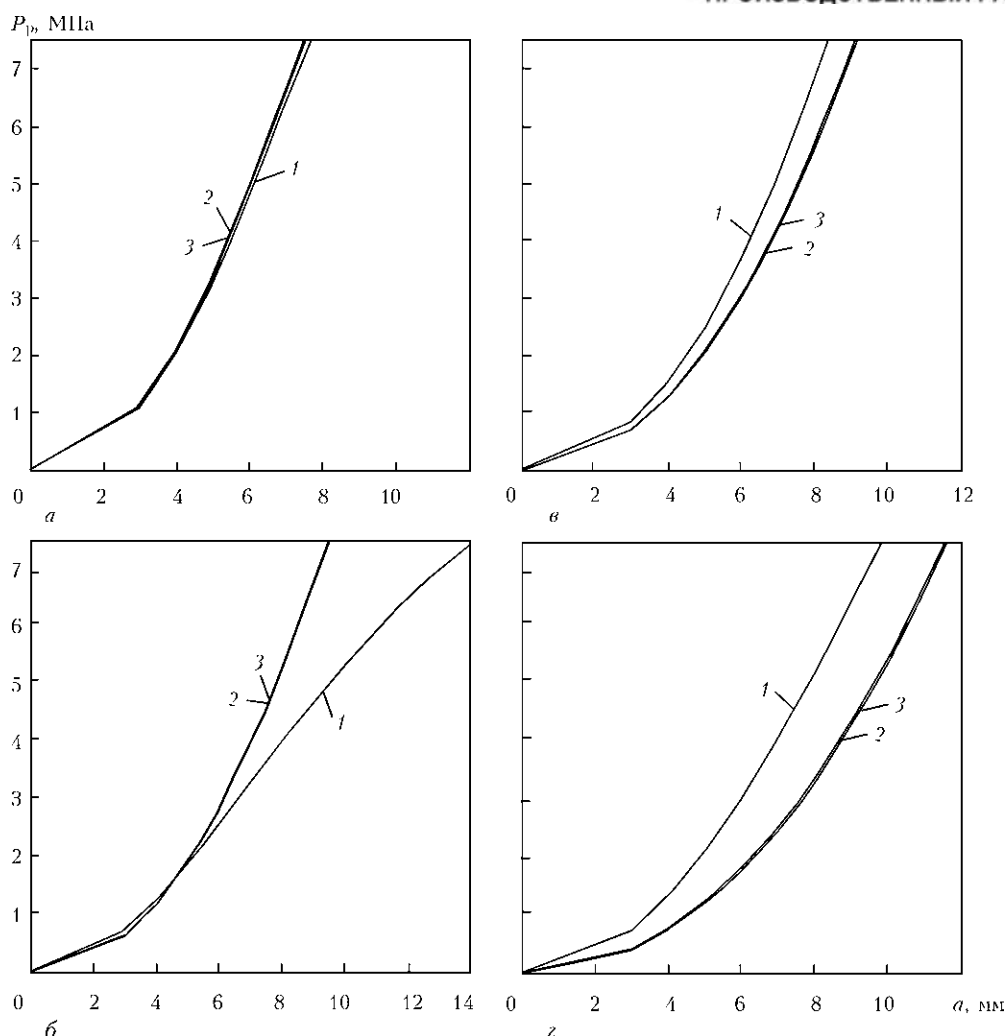


Рис. 5. Зависимость расчетной ширины a зоны сплавления кольцевого шва от внутреннего давления P_p в момент установки тройника для трубы Ду 1000 мм: а, в — $t_2/t_1 = 1$; б, г — 2; а, б — $t_1 = 10$ мм; в, г — 16; 1 — $L_1 = 200$; 2 — 500; 3 — 1000 мм

$= 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; $\sigma_T = 360$ МПа; $\sigma_B = 510$ МПа.

Материал сварных соединений по свойствам близок к основному металлу, за исключением величины K_{IC} . С целью получения консервативных оценок допустимых размеров сварного шва с учетом достаточно широкого разброса экспериментальных данных для металла шва принимали $K_{IC} = 1500 \dots 1000$ МПа $\cdot$ мм $^{1/2}$.

Результаты расчетов относительно размеров a для конкретных геометрических параметров трубопроводов и разрезных тройников представлены на рис. 4, 5. При этом учитывалось соотношение толщины их стенок и внутреннее давление в трубопроводе во время установки разрезных тройников.

Из рисунков видно, что с увеличением диаметра трубопровода значение a возрастает, причем наиболее интенсивно при давлении, близком к эксплуатационному. Повышение толщины стенки тройника требует больших предельных значений a . Например, при соотношении $t_2/t_1 = 1,0$ (t_2, t_1 — соответственно толщина стенки тройника и

трубы) для трубы Ду 700 $\times$ 10 мм $a = 6$, для трубы Ду 1000 $\times$ 10 мм — 7,5 мм. При соотношении $t_2/t_1 = 2$ критические размеры изменяются: для трубы Ду 700 $\times$ 10 мм $a = 7,5$, для Ду 1000 $\times$ 10 мм — 9,5 мм.

С повышением толщины стенок соединяемых элементов расчетные значения a значительно возрастают (рис. 4, в, г). Из рассмотренного видно, что с повышением жесткости тройника во всех случаях ширина кольцевых швов a (зона сплавления со стенкой трубопровода) имеет значительные размеры, особенно при установке его при рабочем давлении в трубопроводе. Это приводит к большому объему сварочных работ во время монтажа указанной конструкции. Поэтому для оптимизации технологического процесса и обеспечения надежной работоспособности сварных узлов необходимо снижать (по возможности) внутреннее давление в трубопроводе перед установкой разрезных тройников.

Для получения качественной картины влияния жесткости соединяемых элементов на геометрические параметры кольцевых сварных швов

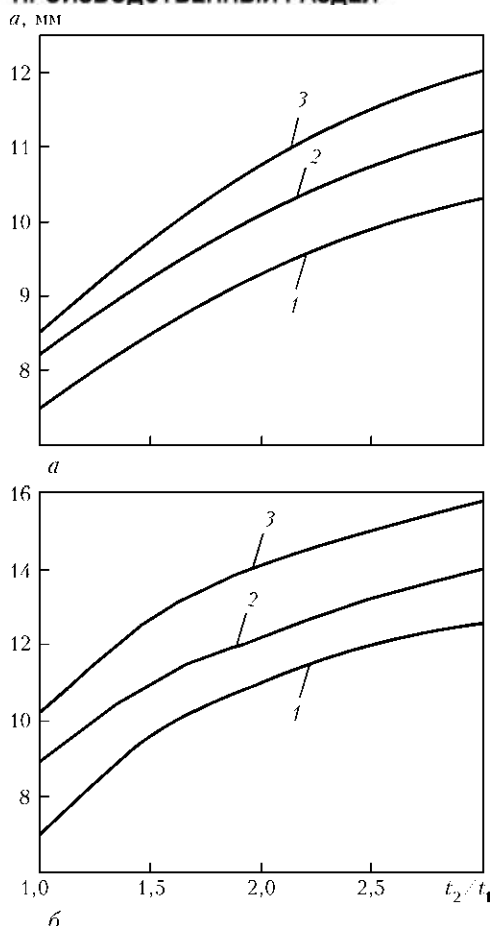


Рис. 6. Влияние толщины стенки тройника t_2 при фиксированной толщине стенки трубы t_1 для трубопровода Ду 700 мм на значения a при $P_p = 5,5$ МПа, $K_{IC} = 1000$ МПа·мм^{1/2}: а — $\sigma_T = 360$; б — 440 МПа; 1 — $t_1 = 10$; 2 — 12; 3 — 14 мм

были построены графические зависимости для ряда вариантов установки тройников с разным соотношением толщины стенок на трубопроводах Ду 700 мм и Ду 1000 мм при давлении 5,5 МПа, а также с учетом прочностных характеристик металла соединяемых конструктивных элементов. Из рис. 6 видно, что в целом сохраняется зависимость ширины кольцевого шва a от жесткости тройника для обоих диаметров трубопровода, т. е. увеличение толщины стенки разрезных тройников, которые устанавливаются на действующий трубопровод, приводит к возрастанию расчетной компоненты a . При этом чем больше толщина стенки трубопровода, тем выше значение a . Относительно влияния диаметра трубопровода следует отметить, что для трубы Ду 1000 мм значения a выше, чем для Ду 700 мм, на 20...30 %. Кроме того, повышение прочностных характеристик металла трубопровода приводит к увеличению указанной расчетной ширины зоны сплавления кольцевого шва с трубой.

Таким образом, при разработке технологии сварки разрезных тройников на действующих трубопроводах, когда задаются геометрические параметры кольцевых сварных швов, которые рассчи-

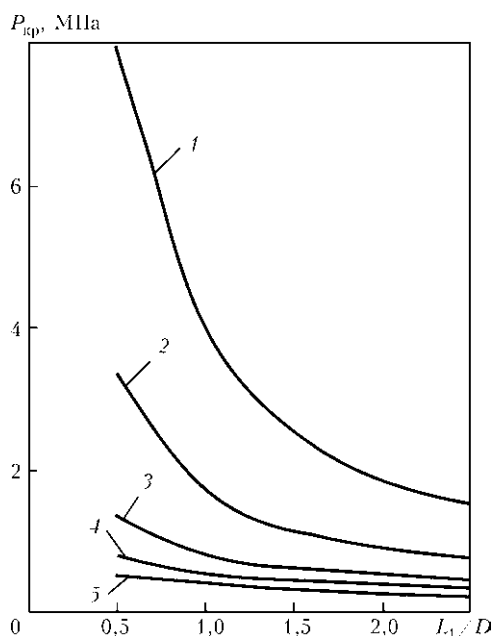


Рис. 7. Зависимость критического давления $P_{кр}$ от соотношений геометрических параметров трубы L_1/D : $t_2/t_1 = 40$; 2 — 60; 3 — 80; 4 — 100; 5 — 120

тываются для конкретного случая, необходимо ориентироваться в первую очередь на то, что толщина стенок трубопровода и тройника является исходными данными, а изменять можно только внутреннее давление в трубопроводе в сторону уменьшения на время монтажа конструктивного элемента.

Определение допустимых параметров гидравлических испытаний сварного узла на герметичность и прочность. При выполнении работ по присоединению отводов к магистральным трубопроводам под давлением, кроме физических методов контроля, предусмотрены испытания сварных соединений тройника с трубопроводом на прочность и герметичность, которые выполняются перед вырезкой отверстия. При этом уровень испытательного давления, которое создается водой или инертным газом между стенками трубы и тройника, колеблется в пределах $1,0...1,5 P_p$, где P_p — рабочее давление. В некоторых случаях оговаривают, чтобы испытательное давление равнялось давлению в трубопроводе.

Согласно нормативным документам, трубопровод перед вводом в действие должен быть подвергнут гидравлическим испытаниям при давлении, которое создает напряжение в его стенке около $0,95 \sigma_T$. Как известно, эффективность испытаний с целью оценки прочности и выявления дефектов в узлах трубопровода повышается с увеличением нагрузки. Однако при этом необходимо придерживаться предельных значений давления и деформаций.

При установке уровня испытательного давления для сварных соединений тройника с трубопроводом нужно учитывать возможность потери ус-



Рис. 8. Потеря устойчивости внутренней оболочки (выпячивание) во время испытания внутренним давлением

стойчивости стенки магистральной трубы, поскольку расчетная толщина стенки тройника значительно превышает толщину стенки основной трубы.

Верхнее критическое внешнее давление, при котором происходит выпячивание стенки трубы внутрь, определяется формулой из работы [6]

$$P_{кр} = \frac{D^* R^*}{n^2 - 1} \left\{ \left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{n^2}{R^2} \right) + \frac{1}{R^4} \left[1 - 2 \left(\mu \frac{\pi^2 R^2}{l^2} + n^2 \right) \right] \right\} + \frac{Et_1}{R} \frac{\pi^4}{l^4} \frac{1}{\left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{n^2}{R^2} \right) (n^2 - 1)}, \quad (1)$$

где $D^* = D - t_1$ — срединный диаметр трубы; $R^* = 0,5 D^*$; l — длина трубы, в данном случае расстояние между кольцевыми нахлесточно-стыковыми швами L_1 . Коэффициент n рассчитывается по формуле

$$n = \sqrt[4]{6\pi^2 \sqrt{1 - \mu^2}} \frac{R^*}{\sqrt[4]{l}} \sqrt[4]{\frac{R^*}{t_1}}. \quad (2)$$

На рис. 7 представлена зависимость критического давления, при котором происходит потеря устойчивости стенки трубы, рассчитанного по формуле (1) с учетом приведенного коэффициента от соотношения геометрических параметров отрезка трубы, ограниченного двумя кольцевыми сварными швами тройника с трубопроводом.

Заметно, что с увеличением диаметра трубопровода при одинаковой толщине стенки значение внешнего давления, которое вызывает потерю устойчивости стенки трубы, уменьшается. Подобное происходит и при увеличении длины тройника.

Экспериментальные исследования, проведенные на стендах, которые имитируют реальную конструкцию соединения тройника с трубопро-



Рис. 9. Присоединение отвода Ду 150 мм к магистральному газопроводу «Союз» Ду 1400 мм, находящемуся под внутренним давлением 4,9 МПа

водом, подтверждают достоверность потери устойчивости внутренней оболочки при давлении, значительно меньшем, чем нужно для опрессовки внешней оболочки. Так, для оболочки диаметром 320 мм с толщиной стенки 3 мм длиной 600 мм потеря устойчивости происходит при внешнем давлении 1,8 МПа, что хорошо согласуется с расчетными данными. Выпячивание внутрь трубы вдоль образующей происходит внезапно при достижении давления $P_{кр}$. Потом происходит пластическая деформация металла в месте выпячивания без последующего увеличения нагрузки. При этом прогиб к центру кривизны увеличивается и возможно возникновение других вмятин (рис. 8).

Нарушение герметичности кольцевых сварных соединений наблюдалось только при значении ширины зоны сплавления шва со стенкой трубы $a < 2$ мм и значительных угловых деформациях.

Таким образом, гидравлическим методом почти невозможно обнаружить дефекты в сварных соединениях тройника с трубопроводом, поскольку испытательное давление $P_{исп}$ в межтрубном пространстве не должно превышать внутреннее $P_{внутр}$ в трубопроводе на значение критического давления $P_{кр}$, которое вызывает потерю устойчивости внутренней оболочки ($P_{исп} - P_{внутр} < P_{кр}$). Как показал анализ расчетов, при выполнении сварочно-монтажных работ на трубопроводе со снижением внутреннего давления до 30 % P_r , испытание на герметичность сварных соединений может выполняться при рабочем давлении ($P_{исп} = P_r$).

Внедрение разработок. На основании результатов научных исследований и экспериментальных работ, выполненных Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с ДК «Укртрансгаз» и ОАО «Укртранснафта», были разработаны Инструкция по присоединению отводов к магистральным газопроводам и ВБН В.3.1-0001.3741-07-2007 «Магистральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок». В указанных нормативно-технических документах предусматривается: конструктивно-технологическая схема узла присоединения отвода; подготовка и контроль участка тру-



бопровода; последовательность монтажа конструктивных элементов на трубопроводе; технология выполнения сварных соединений и контроль их качества ультразвуковым методом; техника безопасности проведения ремонтных работ.

На объектах ДК «Укртрансгаз» выполнено внедрение технологии присоединения отводов к магистральным газопроводам с использованием сварного узла патрубков–муфта. Так, с целью газификации прилегающих населенных пунктов в УМГ «Львовтрансгаз» были выполнены работы по подключению четырех распределительных газопроводов Ду 200 мм к основной магистрали Ду 1400 мм, а в УМГ «Прикарпаттрансгаз» — один газораспределительный трубопровод низкого давления Ду 150 мм к магистральному газопроводу Ду 1400 мм (рис. 9).

Анализ технического состояния магистральных трубопроводов Украины подтверждает необходимость в разработках современных методов их ремонта и реконструкции без вывода из эксплуатации. Значительный объем ремонтных технологий разработан для восстановления несущей способности линейной части трубопроводов с коррозионно-механическими повреждениями и недопустимыми дефектами в кольцевых стыках трубопроводов под давлением. Эти технологии нашли широкое применение на объектах ДК «Укртрансгаз» и ОАО «Укртранснафта».

Актуальной остается проблема замены протяженных дефектных участков магистральных трубопроводов или присоединение отводов в условиях эксплуатации, для реализации которых применяются разрезные тройники.

С целью обеспечения работоспособности конструкций расчетным методом определены минимально допустимые геометрические размеры кольцевых швов в нахлесточно-стыковых сварных соединениях тройников с трубопроводом в зависимости от внутреннего давления во время установки разрезного тройника с учетом возможной аварийной остановки перекачки продукта и сброса давления до нуля.

Установлено, что с повышением диаметра трубопровода ширина кольцевых швов увеличивается при давлении, близком к эксплуатационному.

Аналогичное влияние оказывает увеличение толщины стенки тройника. На размеры кольцевых швов значительно влияют соотношение толщин соединяемых элементов и в меньшей степени прочностные характеристики металла, из которого изготовлены трубы. Учитывая, что толщина стенки разрезных тройников значительно превышает таковую в трубопроводе, при установке их на трубопроводе с рабочим внутренним давлением расчетная ширина кольцевых швов должна иметь большие значения. Это приводит к большому объему сварочных работ во время монтажа указанной конструкции. Поэтому для оптимизации технологического процесса и обеспечения надежной работоспособности сварных узлов необходимо снижать внутреннее давление в трубопроводе перед установкой разрезных тройников.

Гидравлические испытания на герметичность сварных соединений тройника с трубопроводом показали, что испытательное давление не должно превышать внутреннего на значение критического давления, при котором возможна потеря устойчивости стенки трубы, заключенной между двумя кольцевыми швами.

1. Бут В.С., Грецкий Ю.Я., Розгонюк В.В. Обгрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском // Нафт. і газ. пром-сть. — 2001. — № 4. — С. 33–39.
2. Математическое моделирование язвенных дефектов в действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
3. Якубек П. Монтаж тройников и фитингов «Т. Д. Вильямсон» на действующий трубопровод // Сварочные и родственные технологии при строительстве, реконструкции и ремонте газонефтепроводов: Материалы междунар. конф., г. Москва, 22–23 нояб. 2007 г. — М., 2007.
4. Определение допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах / В. И. Махненко, В. С. Бут, Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 7–12.
5. Assessment of integrity of structures containing defects / I. Milne, R. A. Ainsworth, A. R. Dowling, A. T. Stewart // CEBG Report R/H/R6, Revision 3, Apr. 1986.
6. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.

The effect of thickness of walls of the connecting elements, internal pressure during installation, and distance between the circumferential welds that connect a tee-joint with a pipeline on geometric dimensions of the above welds was studied. Nomograms were plotted to determine allowable pressures in hydraulic tests of the resulting welded joints, depending upon the length of an installed tee-joint and rigidity of a pipeline. Examples of application of the design and technological solutions are given.

Поступила в редакцию 21.05.2009

ВЛИЯНИЕ ДВУХСТРУЙНОЙ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ GL-E36

Д. А. ЧИНАХОВ, канд. техн. наук (Юргинский технолог. ин-т, филиал Томск. политехн. ун-та, РФ)

Рассмотрено влияние при многослойном дуговом процессе в смеси газов двухструйной газовой защиты на качество сварных соединений низколегированной судостроительной стали. Отмечена возможность снижения химической и структурной неоднородности в соединениях и повышения механических свойств.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированная сталь, многослойный шов, двухструйная защита, химический состав, распределение твердости, механические свойства

Одной из важных проблем современного производства является улучшение технико-экономических показателей сварных конструкций путем снижения их удельной металлоемкости, увеличения эксплуатационной надежности, равнопрочности и долговечности [1]. Совершенствование технологии изготовления позволило повысить уровень служебных свойств низколегированного и легированного проката и в первую очередь его стойкость к образованию холодных трещин. Данные стали обеспечивают безопасность эксплуатации крупногабаритных сооружений, мостовых конструкций, корпусов судов и магистральных трубопроводов [2]. При этом желательно, чтобы сварные соединения характеризовались требуемыми эксплуатационными и технологическими свойствами без дополнительной термообработки [3].

Еще одним фактором, усложняющим получение качественных равнопрочных сварных соединений, является подверженность легированных сталей охрупчиванию в результате насыщения металла шва водородом [4] и образование высоко-температурной химической микронеоднородности (ВХМН) в околошовной зоне [5], что при высоких внутренних напряжениях или циклической внешней нагрузке может служить причиной зарождения трещин и приводить к разрушению сварной конструкции.

Насыщение металла шва водородом происходит в результате длительного пребывания сварочной ванны в жидкой фазе, что способствует лучшему перемешиванию электродного металла с основным и приводит к снижению уровня ВХМН, структурной и прочностной неоднородности в зоне сплавления [6]. Сократить время пребывания металла сварочной ванны в жидкой фазе и од-

новременно увеличить скорость его перемешивания можно с помощью импульсно-динамических воздействий, например, управления переносом электродного металла в сварочную ванну [7] или двухструйной газозащитной средой [8–10] и др.

Цель данной работы — определение влияния двухструйной газовой защиты зоны сварки на химический состав и эксплуатационные свойства соединений из судостроительной стали GL-E36.

Исследования проводили на образцах из судостроительной стали GL-E36 размером 150×300 мм, толщиной 18 мм с щелевой разделкой кромок (рис. 1), полученных с применением двух способов сварки плавящимся электродом стационарной дугой в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO₂ — традиционным с одноструйной газовой защитой (первый способ) и разработанным с двухструйной газовой защитой (второй) [11].

Согласно проведенным ранее исследованиям [12], сварку выполняли низкоуглеродистой сварочной проволокой Union K52 диаметром 1,2 мм. При сварке образцов стационарной дугой поддерживался следующий режим: $I_{св} = 185...190$ А; напряжение на дуге $U_d = 26...27$ В; скорость сварки $v_{св} = 25...26$ см/мин; скорость подачи электродной проволоки $v_{пр} = 6,8...7,0$ м/мин; расход защитного газа $Q = 11...12$ л/мин. Использовали источник питания ESAB Aristo 500 и автоматическую сварочную головку VEB Schweissttechnik Finsterwalde BEM 5 201.05.

На полученных сварных образцах провели исследование химического состава металла шва и

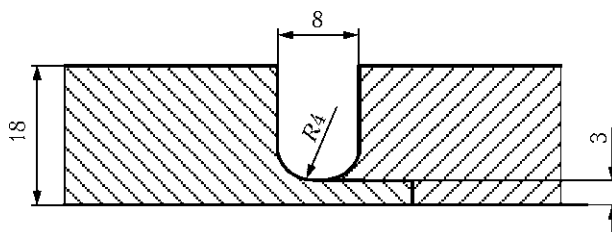


Рис. 1. Схема щелевой разделки кромок U-образной формы



Таблица 1. Результаты химического анализа металла образцов, мас. %

Исследуемый образец	C	Si	Mn	P	S	Cr
Сталь GL-E36	0,161	0,437	1,25	0,011	0,013	0,03
Проволока Union K 52	0,080	0,850	1,50	0,025	0,025	0,20
Металл шва при первом способе сварки	0,098	0,665	1,20	0,013	0,025	0,051
То же при втором	0,107	0,531	1,05	0,013	0,023	0,055

Окончание табл. 1

Исследуемый образец	Al	Cu	N	Nb	V	Mo	Ni
GL-E36	0,031	0,016	0,006	0,037	0,005	0,025	0,041
Union K 52	—	—	—	—	—	—	0,250
Металл шва при первом способе сварки	0,004	0,092	0,004	0,002	0,009	0,011	0,037
То же при втором	0,005	0,081	0,005	0,005	0,005	0,013	0,037

Таблица 2. Результаты исследований ударной вязкости и твердости сварных соединений

Способ сварки	KCV, кДж/м ² , при -20 °C		HV		
	С надрезом по линии сплавления	С надрезом по центру шва	Основной металл (точка 7)	ЗТВ (точки 4–6)	Шов (точки 1–3)
Первый	32...71	98...119	156	175/181/193	194/193/215
Второй	49...74	75...81		176/170/175	182/185/178

Примечание. Точки 1–7 — см. на рис. 2.

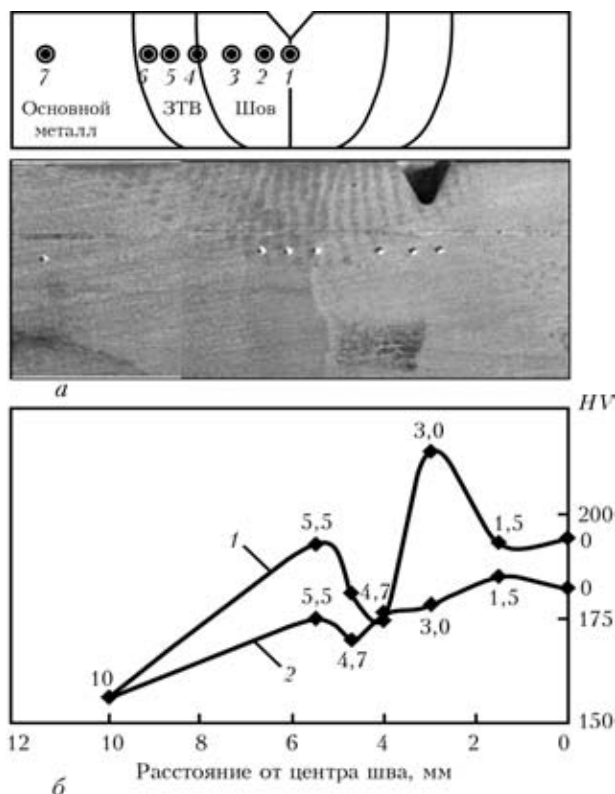


Рис. 2. Схема измерения (а) и распределение твердости HV по сечению сварного соединения (б): 1 — первый способ сварки; 2 — второй

стали GL-E36 (табл. 1), его структуры, ударной вязкости и распределения твердости в сечении шва, механических свойств (в Otto-von-Guericke-Universitaet Magdeburg, Institut fuer Werkstoff- und Fuegetechnik, Магдебург, Германия).

По результатам проведенного исследования установлено, что при сварке с двухструйной газовой защитой наблюдается уменьшение в металле сварного шва содержания кремния на 20 % и марганца на 12 % по сравнению со сваркой с традиционной одноструйной газовой защитой. Уменьшение содержания кремния и марганца свидетельствует об интенсивности протекания металлургических процессов в сварочной ванне, что увеличивает пластичность сварного соединения и уменьшает химическую неоднородность.

Использование двухструйной газовой защиты в сочетании с рациональным режимом сварки позволяет добиться выравнивания значений ударной вязкости и твердости по сечению сварного соединения. Верхний предел значения ударной вязкости по линии сплавления практически совпадает с нижним пределом по центру шва (табл. 2), что также свидетельствует об интенсивном перемешивании электродного металла с основным.

Таким образом, обеспечивается требуемый уровень механических свойств металла шва, что позволяет существенно снизить угрозу хрупкого разрушения сварных соединений под действием

Таблица 3. Результаты механических испытаний сварных соединений на растяжение

Объект испытаний	$\sigma_{0,2}$, МПа, при способе сварки		σ_b , МПа, при способе сварки	
	первом	втором	первом	втором
Сварные соединения стали GL-E36	$\frac{327...340}{334}$	$\frac{337...345}{341}$	$\frac{471...479}{475}$	$\frac{479...481}{480}$
Сталь GL-E36	355		490...620	
Проволока Union K 52	420...450		540...570	

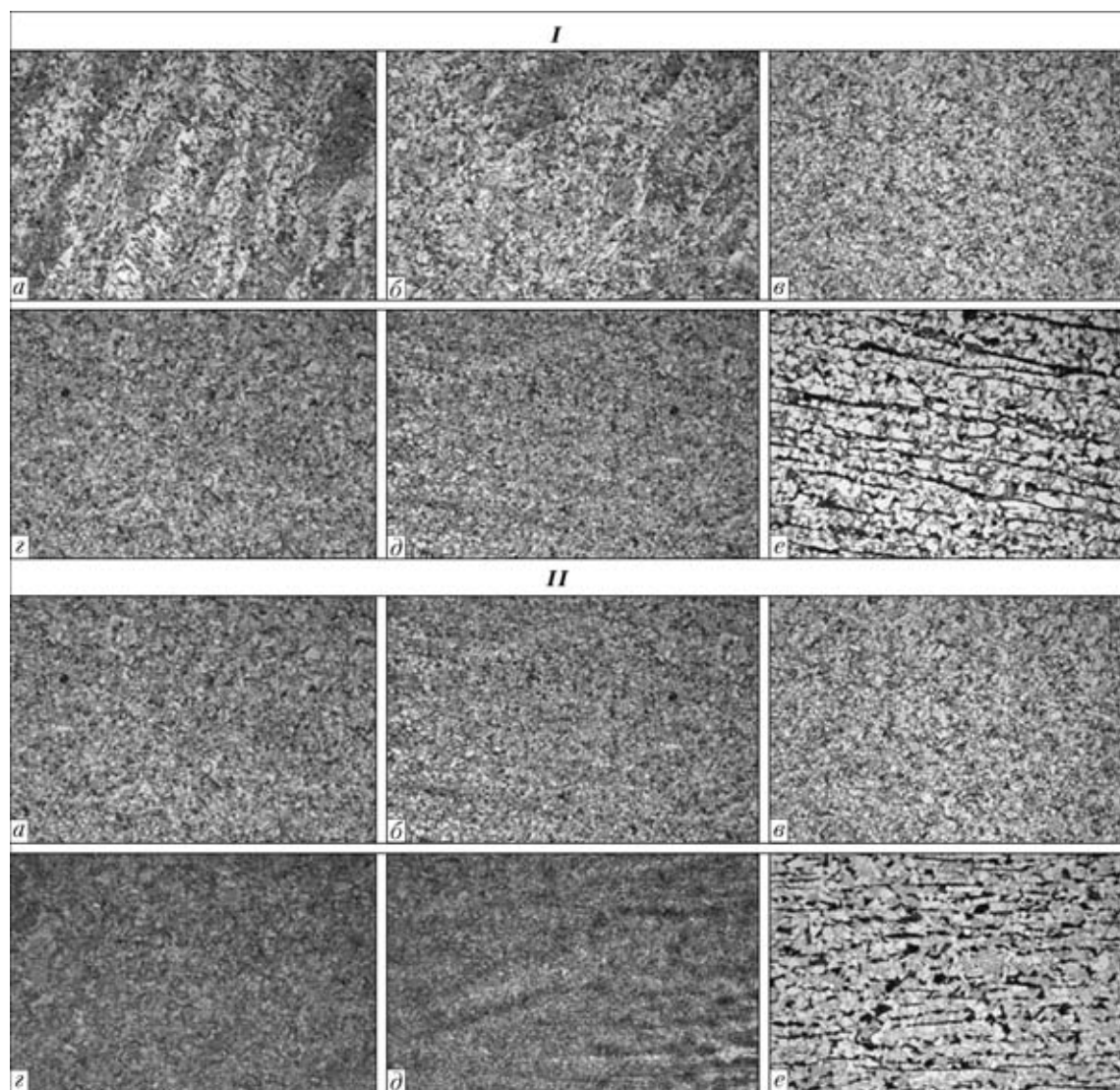


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 140$) сварных соединений судостроительной стали GL-E36, полученных первым (I) и вторым (II) способом сварки: а — металл шва; б — линия сплавления; в — участок перегрева; г — участок нормализации (перекристаллизации); е — основной металл

внешней циклической нагрузки при низких температурах.

График распределения твердости (рис. 2) показывает, что при сварке с двухструйной газовой защитой наблюдается более равномерное распределение твердости по сечению сварного соединения, что еще раз подтверждает наличие интенсивного перемешивания электродного металла с основным.

Важно, что по сравнению с традиционным, разработанный способ сварки позволяет избежать резкого изменения твердости на наиболее подверженных к образованию трещин участках (линия сплавления и металл ЗТВ), что уменьшает остаточные напряжения и вероятность появления холодных трещин.

Результаты микроструктурного анализа (рис. 3) подтверждают, что сварка с двухструйной газовой



защитой обеспечивает лучшее перемешивание основного металла с электродным, способствует измельчению структуры металла шва, формирует плавный переход от наплавленного металла к основному и увеличивает равнопрочность сварного соединения (см. рис. 2).

Испытания образцов на разрыв проводили с использованием оборудования фирмы Zwick (табл. 3) (Otto-von-Guericke-Universitaet Magdeburg, Institut fuer Werkstoff- und Fuegetechnik, Magdeburg, Германия).

Проведенный сравнительный анализ механических свойств сварных соединений стали GL-E36 с различными видами фронта газовой защиты (табл. 3) показал стабильность и качество выполнения процесса сварки первым и вторым способом. Близость значений временного сопротивления разрыву образцов, полученных двумя способами сварки, объясняется их близкими значениями твердости в зоне разупрочнения при одновременном значительном отличии распределений в сечении твердости, так как разрушение всегда происходит в разупрочненном месте (см. рис. 2). Зона разупрочнения является самой чувствительной к тепловложению, а поскольку по тепловложению сравниваемые способы почти совпадают, то и значения твердости и временного сопротивления разрыву соизмеримы.

Установлено, что разработанный способ сварки многослойных соединений легированных сталей с щелевой разделкой в условиях двухструйной газовой защиты стационарной дугой обеспечивает уменьшение химической, прочностной и структурной неоднородности в соединениях, надежное качество и требуемые механические свойства сварных соединений, способствует измельчению структуры металла шва и формирует плавный переход от наплавленного металла к основному, что увеличивает эксплуатационную надежность и рав-

нопрочность сварных соединений. Разработанный способ сварки легированных сталей в щелевую разделку можно широко использовать в машино- и судостроении, оборонной промышленности, для ремонта и строительства трубопроводов.

1. Акулов А. И., Алехин В. П., Ермаков С. И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: Учеб. для вузов. — М.: Машиностроение, 2003. — 560 с.
2. Фролов К. В. Машиностроение: Энциклопедия. — М.: Машиностроение, 2006. — 768 с.
3. Лобанов Л. М., Миходуй Л. И., Гордонный В. Г. Состояние и перспективы применения в сварных конструкциях высокопрочных сталей с улучшенной свариваемостью // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 29–34.
4. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учеб. для высш. техн. учеб. заведений. — М.: Машиностроение, 1990. — 528 с.
5. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
6. Химическая и структурная неоднородности в зоне сплавления низкоуглеродистой стали с аустенитным швом при сварке в защитных газах / В. П. Елагин, В. В. Снисарь, М. М. Савицкий // Автомат. сварка. — 2001. — № 4. — С. 8–13.
7. Сараев Ю. Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. — Новосибирск: Наука, 1994. — 108 с.
8. Применение двухструйных сопловых устройств для сварки в среде защитных газов / В. Т. Федько, С. С. Киянов, В. С. Шматченко, С. Б. Сапожков // Автоматизация и современ. технологии. — 2003. — № 3. — С. 12–18.
9. Дуговая сварка с воздействием на сварочную ванну направленных газоструйных потоков / М. М. Штрикман, А. С. Павлов, А. Н. Сабанцев, В. Н. Егоров // Свароч. пр-во. — 1999. — № 12. — С. 3–6.
10. Чинахов Д. А., Федько В. Т., Сараев Ю. Н. Сварка легированных сталей в щелевую разделку без термообработки // Технология металлов. — 2005. — № 10. — С. 27–29.
11. Пат. 2233211 РФ, 7 В 23 К 9/173//В 23 К 103:04. Способ сварки / Д. А. Чинахов, В. Т. Федько, Ю. Н. Сараев. — Оpubл. 27.07.2004.
12. Сараев Ю. Н., Чинахов Д. А., Шпигунова О. И. Способы повышения трещиностойкости сварных соединений легированных сталей типа 30ХГСА // Технология машиностроения. — 2001. — № 1. — С. 35–39.

The effect of a two-jet gas shielding on the quality of welded joints on low-alloy shipbuilding steel in multilayer arc welding in the gas mixture shielding atmosphere is considered. The possibility of reducing chemical and structural heterogeneities in the joints and improving their mechanical properties is noted.

Поступила в редакцию 27.11.2008

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ БЕСФЛЮСОВОЙ ПАЙКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

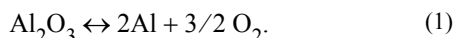
Е. И. СТОРЧАЙ, д-р техн. наук, Ю. В. ГОРБАТСКИЙ, Л. С. ЛАНТУШЕНКО, кандидаты техн. наук
(ОАО «Криогенмаш», г. Балашиха Москов. обл., РФ)

Проанализированы существующие способы высокотемпературной бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов, типичные области их использования и характерные недостатки. Предложен новый высокопроизводительный способ пайки в среде аргона с использованием пористого титана (геттера).

Ключевые слова: бесфлюсовая пайка, пайка в вакууме, пайка в аргоне, алюминиевые сплавы, оксидная пленка, припой, геттер, пары магния, пористый титан, подготовка поверхности, очиститель, прочность паяных соединений

Как известно, наличие оксидных пленок на поверхности алюминия препятствует его пайке, причем ни один из процессов их удаления (диссоциация, возгонка, растворение оксидов в основном металле и расплавленном припое) при нагреве в вакууме или нейтральных газовых средах самопроизвольно не реализуется.

Действительно, условие диссоциации оксидной пленки при нагреве до температуры пайки алюминия не выполняется, поскольку давление диссоциации оксида алюминия $P_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ несоизмеримо меньше остаточного давления кислорода P_{O_2} в практически достижимом вакууме или атмосфере инертных газов. В связи с этим равновесие реакции смещается влево:



Учитывая то, что оксидная пленка Al_2O_3 характеризуется проводимостью n -типа, скорость окисления алюминия практически не зависит от P_{O_2} , поскольку

$$V = A \left(\sqrt[n]{\frac{1}{P_{\text{Al}_2\text{O}_3}}} - \sqrt[n]{\frac{1}{P_{\text{O}_2}}} \right), \quad (2)$$

где V — константа скорости реакции; A — const; n — коэффициент, зависящий от типа проводимости и степени разупорядоченности оксидной пленки ($n \geq 2$).

Оксидная пленка Al_2O_3 не растворяется ни в твердом, ни в жидком металле; температура возгонки оксида в вакууме $1 \cdot 10^{-3}$ Па близка к тем-

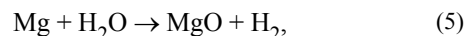
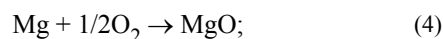
пературе плавления Al_2O_3 ; температура испарения алюминия выше его температуры плавления.

В настоящее время разработано несколько способов бесфлюсовой пайки алюминия, имеющих практическое значение, к которым относятся такие виды пайки, как пайка в высоком вакууме в присутствии паров магния, в низком вакууме в присутствии паров магния и титановой губки, в вакууме в присутствии пористого титана, в аргоне в присутствии пористого титана.

В основе способа пайки алюминия в высоком вакууме в присутствии паров магния [1–3] лежит их способность вступать в металлотермическую реакцию с оксидной пленкой, восстанавливая ее:



Пары магния и расплавленный припой, проникая на поверхность алюминия через трещины в оксидной пленке, образовавшиеся при нагреве, приводят к контактному твердогазовому и твердожидкому плавлению паяемого металла под пленкой, что способствует ее диспергации. Для смачивания алюминия припоем и последующего его растекания достаточно появления локальных нарушений сплошности оксидной пленки, которая не восстанавливается, поскольку пары магния, взаимодействуя с кислородом и парами воды



снижают парциальное давление непосредственно в зоне реакции и вакуумной камере.

Эффект разрушения оксидной пленки возрастает, если магний введен в основной металл или припой. По нашим данным, магний в процессе нагрева, диффундируя к границе фаз металл–оксид, взаимодействует с оксидной пленкой. После нагрева сплавов АМг0,5 и АМг2 в вакууме $(2 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ Па при температуре 600 °С и выдержке в течение 3 ч магний на поверхности образцов



практически отсутствует. По мере удаления от поверхности содержание его увеличивается, приближаясь к содержанию магния в сплаве в исходном состоянии. Глубина зоны диффузии магния составляет около 300 мкм.

Испарение магния из металла и припоя повышает дефектность оксидной пленки, но при этом приводит к связыванию кислорода и паров воды непосредственно в зоне пайки, что способствует повышению качества паяных соединений.

В настоящее время пайка в вакууме (около $1 \cdot 10^{-3}$ Па) в присутствии паров магния широко применяется при изготовлении крупногабаритных конструкций из алюминиевых сплавов, например пластинчато-ребристых теплообменников (ПРТ).

Недостатками этого способа пайки являются необходимость в периодической очистке стенок камеры печи, экранов, нагревательных элементов и вакуумной системы от сконденсировавшихся паров магния, а также в использовании при пайке многокомпонентных припоев.

Применение пайки в присутствии паров магния и титановой губки [4] позволяет вести процесс при нагреве в вакууме с остаточным давлением менее 10 Па и использовать в качестве припоя силумины без магния. Переход к низкому вакууму возможен благодаря применению вспомогательного контейнера с затвором, уплотненным титановой губкой, и введению паров магния из навески, размещенной в затворе под губкой, которая играет роль неиспаряемого геттера, о чем свидетельствуют данные массоспектрометрического анализа состава воздушной атмосферы после нагрева титана в герметизированном объеме.

Для регенерации титановой губки с целью последующего использования при пайке в работе [5] предложено проводить ее отжиг в вакууме ($5 \cdot 10^{-2}$ Па) при температуре 850 °С в течение 1 ч. При этом потерянные геттерные свойства губки восстанавливались, а количество термических циклов пайки, при которых обеспечивалось смачивание алюминия припоем, сокращалось примерно в 2 раза.

Пайка в присутствии паров магния и титановой губки дает возможность осуществлять процесс на более простом оборудовании, что, по-видимому, перспективно при изготовлении малогабаритных изделий.

Пайка алюминиевых сплавов в вакууме с использованием в качестве неиспаряемого геттера пористого титана [6] позволяет отказаться от применения паров магния. Нагрев изделия вместе с геттером от комнатной температуры до температуры пайки осуществляют в вакууме с промежуточными выдержками для выравнивания поля температуры изделия, а охлаждение — с выдержкой при температуре 500 °С для регенерации геттера [7], что обеспечивает возможность использовать его многократно.

Процесс происходит в вакууме ($1 \cdot 10^{-3}$ Па). Установлено, что при пайке, например, алюминиевого сплава АМц эвтектическим силумином паяные соединения имеют хорошо сформированные галтели, их прочность на срез составляет 100 МПа.

При пайке в вакууме возможен только один безальтернативный способ нагрева — радиационный. Более широкие возможности в выборе способа нагрева (от чисто радиационного до чисто конвективного) существуют при пайке в нейтральной газовой среде, например, аргоне, что позволяет существенно сократить время нагрева конструкции до температуры пайки.

На основе результатов сопоставительного анализа [8] для реализации процесса пайки в среде аргона предложен конвективно-радиационный способ нагрева с внутренней циркуляцией нагреваемого газа и передачей от него теплоты к поверхности изделия за счет вынужденной конвекции и частично радиации от металлоконструкций камеры.

Однако процесс пайки является принципиально возможным, если нагрев конструкции происходит в «безокислительной атмосфере». Между тем, существующие в настоящее время промышленные способы очистки инертных газов от кислорода и паров воды, вызывающих окисление алюминия, позволяют получить, например, аргон с парциальным давлением кислорода и паров воды соответственно 0,15 и 0,18 Па, что значительно больше, чем в вакууме $1 \cdot 10^{-3}$ Па ($P_{O_2} = 4,5 \cdot 10^{-5}$ Па, $P_{H_2O} = 6,65 \cdot 10^{-5}$ Па). Кроме того, в процессе нагрева состав атмосферы в камере пайки непрерывно изменяется. Выделяющиеся из металлов при термической дегазации газы образуются при химическом взаимодействии поверхностных оксидов и других соединений с примесями, находящимися в паяемом металле, материалах камеры и приспособлениях, диффундирующими из объема металла к его поверхности. Константа скорости химической реакции и коэффициент диффузии находятся в экспоненциальной зависимости от температуры

$$V = K e^{-E/RT}; \quad D = K^* e^{-E^*/RT}, \quad (6)$$

где K, K^* — коэффициенты пропорциональности; D — коэффициент диффузии; E, E^* — энергия активации; R — газовая постоянная; T — температура.

С учетом того, что основное количество газа выделяется из объема металла, а лимитирующей стадией процесса дегазации является диффузия, увеличение температуры нагрева от T_1 до T_2 при-

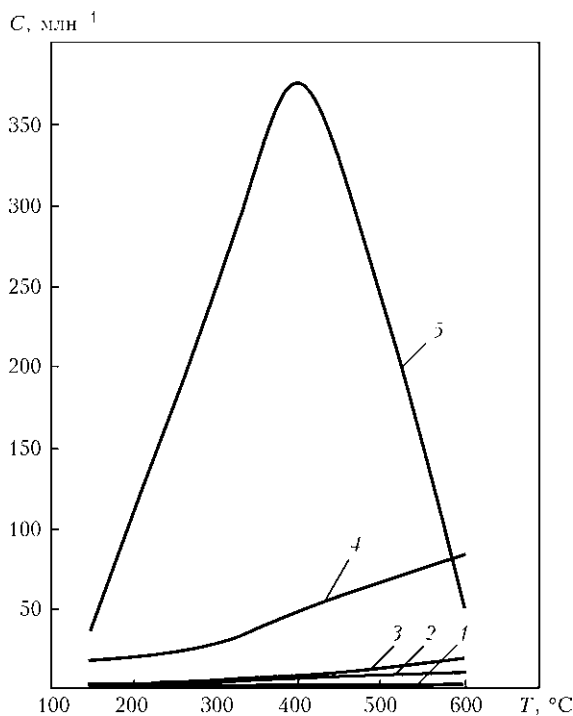


Рис. 1. Изменение состава атмосферы при нагреве в предварительно очищенном аргоне сплава АМц (материал камеры — сталь 12Х18Н10Т): 1 — O_2 ; 2 — CH_4 ; 3 — N_2 ; 4 — H_2 ; 5 — H_2O

водит к уменьшению времени дегазации в $\exp\left[\frac{-E}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]$ раз.

Энергия активации при диффузии газов из металлов равна десяткам джоулей на моль. Расчет показал, что при увеличении температуры нагрева, например, от 150 до 300 °С, интенсивность диффузии газов возрастает в сотни раз.

Как видно из рис. 1, при нагреве до температуры пайки содержание кислорода в камере изменяется незначительно, а концентрация паров воды в аргоне существенно увеличивается. Кривая изменения концентрации влаги становится максимальной при 400 °С, затем концентрация паров воды в камере уменьшается. Это обусловлено в основном десорбцией с поверхности алюминиевой конструкции, материалов камеры и приспособлений физически адсорбированной влаги с последующим окислением алюминия. Десорбция паров воды существенно уменьшается после предварительного нагрева камеры [9]. Поэтому предварительный нагрев камеры в сочетании с вакуумированием и последующим заполнением чистым аргонem позволяет вести нагрев изделия в более благоприятных условиях. Однако получить качественные паяные соединения не удастся, поскольку при температуре пайки концентрация паров воды в аргоне остается высокой ($1,6 \cdot 10^{-2}$ об. %) и алюминий окисляется. Следовательно, непосредственно в процессе нагрева и пайки необходима

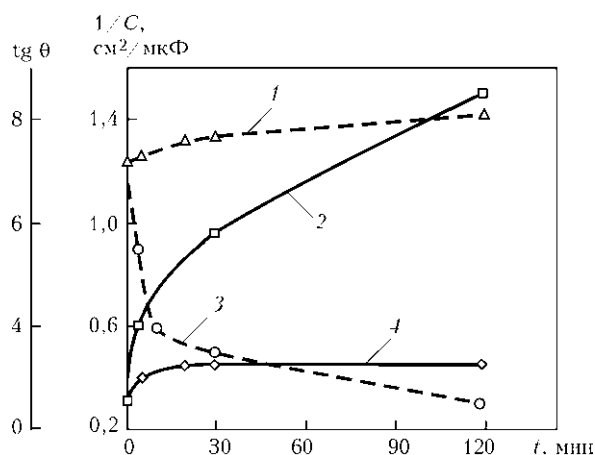


Рис. 2. Зависимость тангенса (1, 3) угла диэлектрических потерь $\tan \theta$ и емкостной толщины оксидной пленки $1/C$ (2, 4) на сплаве АМц от времени выдержки в среде аргона при 600 °С без геттера (2, 3) и с геттером (1, 4)

дополнительная очистка атмосферы камеры, для чего используются геттеры.

Применение в качестве неиспаряемого геттера пористого титана [10] позволяет осуществлять пайку в практически безоxygenной атмосфере. Об этом свидетельствуют результаты электрохимических измерений [11, 12] емкостной толщины оксидной пленки $1/C$ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \theta$ после нагрева сплава АМц в аргоне (рис. 2). При использовании геттера значения $\tan \theta$ и $1/C$ практически не изменяются с увеличением времени выдержки при температуре 600 °С, они указывают на наличие на поверхности сплава в этих условиях тонкой и пористой оксидной пленки.

Развитая поверхность контакта фаз и высокая сорбционная емкость пористого титана позволяют использовать его в качестве геттера многократно, однако после 120...150 ч нагрева при температуре пайки требуется его замена или регенерация в вакууме (табл. 1, 2). Механические испытания образцов сплава АМц, паянных в присутствии титана в состоянии поставки и регенерированного в вакууме ($1...5 \cdot 10^{-3}$ Па при 800 °С в течение 3 ч, показали наличие у них одинаковой прочности на срез. Паяные соединения по качеству практически не отличаются, они имеют хорошо сформированные галтели и одинаковую структуру металла шва.

Таблица 1. Изменение веса ΔG образцов окисленного пористого титана после нагрева в вакууме $5 \cdot 10^{-3}$ Па в течение 3 ч

№ эксперимента	Температура регенерации, °С	ΔG , г/кг
1	500	-0,15
2	600	+0,12
3	800	-0,50



Таблица 2. Изменение веса образцов пористого титана при нагреве в аргоне до 610 °С с выдержкой 3 ч и прочность на срез ($\tau_{\text{ср}}$) соединений сплава АМц, паянных в среде аргона

№ эксперимента	Состояние поверхности титана	ΔG , г/кг	$\tau_{\text{ср}}$, МПа
1	В состоянии поставки	0,952	100
2	Окисленной в процессе пайки в аргоне	0,517	70
3	Восстановленной в вакууме при 800 °С (время выдержки 3 ч)	0,954	95

На основании полученных результатов разработан принципиально новый способ бесфлюсовой пайки алюминия и его сплавов в среде аргона [8, 9, 12, 13], который по сравнению с вакуумной пайкой является более производительным, что особенно важно при изготовлении крупногабаритных алюминиевых конструкций.

Термический цикл пайки включает несколько этапов нагрева и вакуумирования, обеспечивающих минимальный перепад температур в изделии и поддержание необходимого состава атмосферы в камере пайки. Изделие после кристаллизации припоя охлаждают на воздухе вне камеры. Полученные паяные соединения по качеству формирования и прочности не отличаются от паянных в вакууме (рис. 3).

К недостаткам указанного способа следует отнести необходимость предварительной очистки аргона от примесей кислорода и паров воды. Таким образом, применение пористого титана в качестве неиспаряемого геттера позволяет осуществлять бесфлюсовую пайку конструкций из алюминиевых сплавов как в аргоне, так и вакууме без применения паров магния.

Важное значение для получения качественных паяных изделий имеет рациональный выбор конструкционных материалов и припоев. Чаще всего при бесфлюсовой пайке применяют промышленные сплавы системы Al–Mn (АМц) и Al–Mg (АМг0,5 и АМг2), не упрочняемые термообработкой, а также термоупрочняемые сплавы систем Al–Mg–Si (АД31 и АВ) и Al–Mg–Si–Cu (АД33). При их пайке в вакууме в присутствии паров магния применяют припои системы Al–Si и силу-

мины, легированные магнием. При пайке в вакууме или аргоне в присутствии пористого титана нет необходимости в использовании припоев, содержащих магний.

Механические свойства сплавов систем Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu существенно повышаются при закалке с последующим естественным или искусственным старением. Кроме основных упрочняющих фаз $\alpha + \text{Mg}_2\text{Si}$

или $\alpha + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{Si}$, в сплавах могут присутствовать также интерметаллидные соединения типа AlSiFe, AlCrFeSi, AlFeMnSi, AlMnSi [14]. Для их паяных соединений характерно образование по границам зерен легкоплавких эвтектик, что уменьшает положительное влияние магния на прочность соединений. Междолинное проникновение припоя особенно характерно для сплавов, содержащих медь. Кроме того, в результате диффузии меди в припой происходят снижение его температуры плавления и увеличение растворения паяемого металла в припое.

Температура пайки сплавов АВ, АД31, АД33 не должна превышать 580 °С, поскольку их температура солидуса составляет соответственно 592, 595 и 585 °С, а перегрев выше этой температуры ведет к пережогу и ухудшению механических свойств основного металла. Кроме того, процесс получения качественных паяных соединений затрудняется близостью температуры ликвидуса эвтектического силумина (577 °С), традиционно применяющегося для пайки и солидуса сплавов системы Al–Mg–Si.

Снижение температуры пайки может быть достигнуто применением припоев с меньшей, чем у эвтектического силумина СИЛ1, температурой плавления. Перспективными в этом плане являются припои системы Al–Ge–Si [15–17]. Результаты наших исследований показали, что использование припоев этой системы при бесфлюсовой пайке алюминиевого сплава АВ позволяет снизить температуру пайки до 560 °С, исключая тем самым возможность пережога основного металла. Значения прочности на срез соединений, паянных

в вакууме аморфно-кристаллическим припоем СТЕМЕТ 1502, более высокие ($\tau_{\text{ср}} = 120$ МПа), чем паянных эвтектическим силумином ($\tau_{\text{ср}} = 90 \dots 100$ МПа).

Одной из причин более высокой прочности соединений, паянных припоем СТЕМЕТ 1502, является малый паяльный зазор, который определяется толщиной припоя (около 0,07 мм).

После пайки сплава АВ эвтектическим силумином структура металла паяных швов состоит из твердого раствора

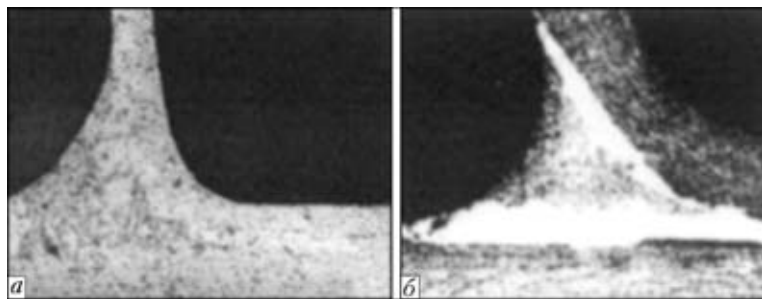


Рис. 3. Микроструктура (Х50) соединений сплава АМц, паянных эвтектическим силумином в присутствии пористого титана в вакууме (а) и среде аргона (б)

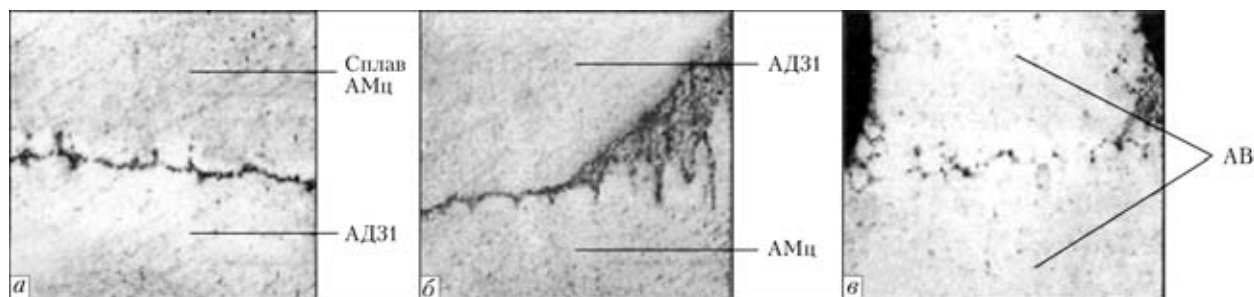


Рис. 4. Микроструктура ($\times 50$) соединений, паянных после обработки алюминиевых сплавов в растворе очистителя Дескалер ФФ в среде аргона (а, в) и вакууме (б)

на основе алюминия и эвтектики Al-Si, которая равномерно распределена в шве и по границам зерен.

Фрактографические исследования разрушенных при испытаниях паяных соединений выявили отличия в характере изломов при пайке припоями, содержащими в своем составе германий, и припоем Al-Si эвтектического состава. После пайки припоем СТЕМЕТ 1502 при 560°C имеет место вязкое разрушение шва по зернам без обнажения их границ, а при использовании припоя СИЛ1 при 580°C преобладает хрупкое разрушение соединения.

Алюминиевые сплавы других систем, упрочняемые термообработкой, а именно, Al-Zn-Mg (B93, B94, B95, B96), Al-Cu-Mg и Al-Cu-Mn (Д1, Д16, Д19, АКД4, АК4-1, АК6, АК8), имеют в своем составе повышенное содержание меди, цинка и магния, что существенно влияет на паяемость этих сплавов. Так, например, цинк и магний отличаются высокой упругостью пара и в процессе нагрева в вакууме испаряются, что приводит к ухудшению смачиваемости сплава припоем, а иногда к вспучиванию основного металла и образованию пузырей [18]. Медь и магний в сплавах при температуре пайки образуют легкоплавкие эвтектики, которые располагаются в основном по границам зерен, что приводит к снижению прочности сплавов. Кроме того, сплавы этих систем имеют низкую температуру солидуса, что исключает применение для их пайки известных припоев.

Среди новых деформируемых термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, имеющих повышенную прочность, могут представлять интерес дисперсионно-твердеющие сплавы, легированные скандием [15, 19]. Результаты исследований [15] показали, что добавки скандия в сплавы 3003, 3004, 3005 позволяют в 1,5...2,0 раза повысить их прочность. Однако высокотемпературный нагрев значительно снижает прочность этих сплавов вследствие коагуляции фазы Al_3Sc , хотя после нагрева в течение 1 ч при температуре 600°C прочность сплава типа 3004, дополнительно легированного скандием, составляет около 200 МПа. Аналогичные данные получены при исследовании низколегированных алюминиевых

сплавов типа 01515 с добавками скандия. Несмотря на то, что скандий является дефицитным и дорогостоящим элементом, применение сплавов системы Al-Mg-Sc в качестве материала для пайки конструкций в ряде случаев может оказаться оправданным.

Качество паяных соединений алюминиевых сплавов существенно зависит от способа предварительной подготовки поверхности деталей к пайке. Так, традиционные щелочное и кислотное травления, хотя и обеспечивают удаление жировых загрязнений и старых оксидных пленок, но не являются экологически чистыми способами подготовки и не отвечают современным требованиям защиты окружающей среды.

В настоящее время созданы очищающие средства широкого спектра применения, представляющие собой нетоксичные, взрывопожаробезопасные, полностью биоразлагаемые жидкости, в составе которых присутствуют поверхностно-активные вещества и компоненты, способные удалять с поверхности алюминиевых сплавов жировые загрязнения и оксидные пленки.

Очистители представляют собой водные растворы щелочного и кислотного характера, которые выпускаются в виде концентратов по соответствующим техническим условиям. Из обшир-

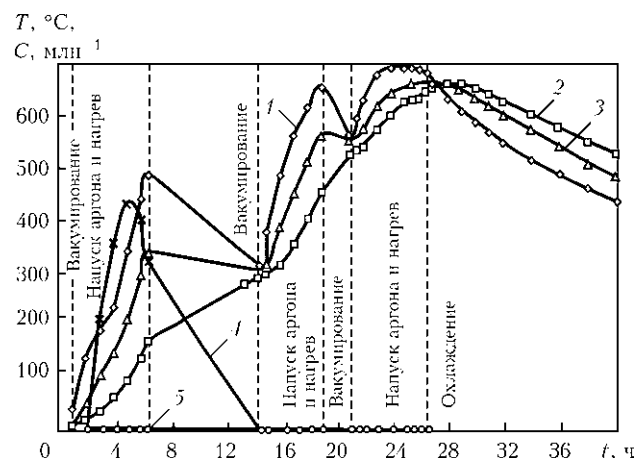


Рис. 5. Термический цикл пайки в аргоне ПРТ размером $1050 \times 850 \times 3000$ мм и изменение содержания кислорода и паров воды в камере в процессе нагрева: 1 — температура газа; 2, 3 — соответственно $T_{\min}$, $T_{\max}$ ПРТ; 4, 5 — содержание C соответственно паров воды и кислорода

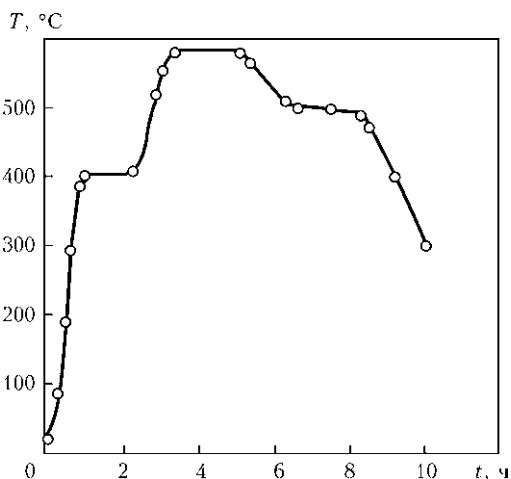


Рис. 6. Термический цикл пайки в вакууме в присутствии пористого титана рабочего колеса турбодетандера диаметром 300 мм



Рис. 7. Внешний вид рабочего колеса турбодетандера диаметром 300 мм

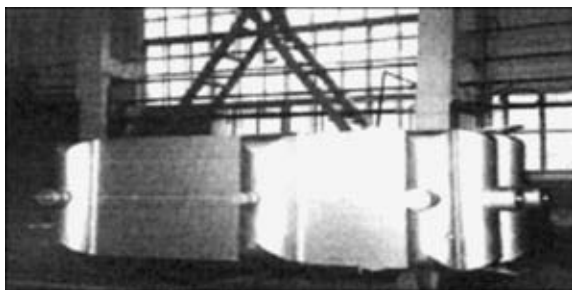


Рис. 8. Внешний вид паяного ПРТ размером 1050×850×3000 мм

ной номенклатуры очищающих средств на основе анализа результатов исследований [20] электрохимического поведения алюминиевых сплавов, скорости их растворения, качества обезжиривания, изменения толщины и дефектности оксидных пленок в растворах нескольких десятков очистителей различных фирм-производителей выбран кислотный очиститель Дескалер ФФ фирмы ООО «ЕСТОС ТЕХНО», который при установленных концентрациях и режимах обработки по всем параметрам в совокупности является наиболее эффективным для подготовки поверхности алюминиевых сплавов к пайке (рис. 4).

При подготовке поверхности деталей из алюминиевых сплавов к пайке в растворе очистителя

Дескалер ФФ при полном удалении жировых загрязнений и оксидных пленок скорость растворения металла на два порядка меньше, чем при традиционном щелочном травлении.

Кроме того, за счет образования на поверхности сплавов плотных пленок фосфатных соединений AlPO_4 и $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ существенно (до 30 сут) увеличивается допускаемое время межоперационного пролеживания деталей, подготовленных к пайке.

В качестве примера на рис. 5, 6 представлены термические циклы пайки ПРТ и рабочего колеса турбодетандера, изготовленных бесфлюсовой пайкой в присутствии пористого титана, а также их внешний вид (рис. 7, 8). Пайку ПРТ выполняли в специальном паяльном агрегате с аэродинамическими нагревателями атмосферы предварительно очищенного аргона [21], рабочего колеса — в стандартной вакуумной печи.

1. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Вопросы теории и технологии пайки. — Саратов: Изд. Саратов. ун-та, 1974. — 248 с.
2. Камба К., Сугияма Е. Сумитомо кэйкиндзоку гихо // Light Metal Technical Reports. — 1985. — 26, № 3. — S. 145–156.
3. Shoer H. Hartloeten von Konstruktionen aus Aluminium Werkstoffen // Bander Bleche Rohre. — 1986. — 27, № 4. — S. 72–74.
4. Перевезенцев Б. Н., Соколова Н. М., Телицына Г. А. Пайка алюминия в низком вакууме // Свароч. пр-во. — 1996. — № 6. — С. 2–4.
5. Перевезенцев Б. Н., Соколова Н. М., Телицына Г. А. Активирование поверхности при вакуумной пайке алюминия // Там же. — 1996. — № 2. — С. 4–5.
6. Сторчай Е. И., Лантушенко Л. С. Экологически чистая технология бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов // Там же. — 2007. — № 12. — С. 22–24.
7. О возможности регенерации титанового геттера, применяемого при пайке алюминиевых конструкций в среде аргона / Е. И. Сторчай, Ю. В. Горбатский, А. В. Соколова, Л. С. Лантушенко // Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной пайки: Материалы семинара, г. Москва, 24–25 нояб. 2004 г. — М.: ЦРДЗ, 2004. — С. 61–66.
8. Горбатский Ю. В., Кортиков В. С., Сторчай Е. И. Термический цикл процесса пайки алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников в среде аргона // Свароч. пр-во. — 2000. — № 2. — С. 34–37.
9. Разработка способа пайки алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников в среде аргона / Е. И. Сторчай, Ю. В. Горбатский, А. В. Соколова, Л. С. Лантушенко // Хим. и нефт. машиностроение. — 1999. — № 9. — С. 6–10.
10. Применение титана в качестве геттера при высокотемпературной бесфлюсовой пайке алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников / Е. И. Сторчай, А. В. Соколова, И. В. Рослан, Л. С. Тарасенко // Изготовление теплообменной аппаратуры: Материалы семинара, г. Москва, 12–13 апр. 1993 г. — М.: ЦРДЗ, 1993. — С. 24–31.
11. Сторчай Е. И. Применение омическо-емкостного метода для исследования процесса флюсования // Свароч. пр-во. — 1975. — № 6. — С. 45–47.
12. Влияние технологических факторов на свойства соединений алюминиевых сплавов при пайке пластинчато-ребристых теплообменников в среде аргона / Л. С. Лантушенко, Ю. В. Горбатский, Е. И. Сторчай, А. В. Соколова // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Пайка-2000», г. Тольятти, 13–14 сент. 2000 г. — Тольятти: ТГУ, 2000. — С. 33.

13. Пат. 2124971, В 23 К 1/012. Способ бесфлюсовой пайки алюминиевых изделий / Н. С. Баранов, С. П. Геталов, Ю. В. Горбатский и др. — Оpubл. 20.01.99.
14. Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы: Справоч. руководство. — М.: Металлургия, 1972. — 552 с.
15. Степанов В. В., Конкевич В. Ю., Суслов А. А. Перспективы повышения прочности паяных конструкций из алюминиевых сплавов // Свароч. пр-во. — 2006. — № 8. — С. 37–43.
16. Суслов А. А. Припой для пайки узлов из алюминиевых сплавов // Пайка: опыт, искусство, наука: Сб. докл. науч.-техн. конф. за 1967–2002 гг. / В. П. Фролов, В. П. Плаунов, И. Ю. Маркова, И. И. Ильина: В 2 т. — Т. 1. — М.: Альфа Доминанта, 2005. — С. 236–239.
17. Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения / Б. А. Калинин, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков и др. // Свароч. пр-во. — 1996. — № 1. — С. 15–19.
18. Термическая обработка титановых и алюминиевых сплавов в вакууме и инертных средах / Г. Г. Максимович, В. Н. Федирко, Я. И. Спектор, А. Т. Пичугин. — Киев: Наук. думка, 1987. — 179 с.
19. Филатов Ю. А., Елагин В. И., Захаров В. В. Алюминиевые сплавы, легированные скандием // Металлургия машиностроения. — 2005. — № 4. — С. 25–30.
20. Новая экологически чистая технология подготовки поверхности алюминиевых сплавов к пайке / Е. И. Сторчай, Ю. В. Горбатский, Л. С. Лантушенко и др. // Свароч. пр-во. — 2001. — № 1. — С. 37–41.
21. Горбатский Ю. В., Сторчай Е. И. Новая экологически чистая технология производства алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников // Хим. и нефт. машиностроение. — 1999. — № 9. — С. 10–11.

Currently available methods of high-temperature fluxless brazing of aluminium alloys, their typical research areas and characteristic disadvantages have been analyzed. A new highly-efficient method of brazing in argon, using porous titanium (getter) is proposed.

Поступила в редакцию 22.09.2008

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

Ю. Н. САРАЕВУ — 60



В сентябре исполнилось 60 лет руководителю Межотраслевого научно-технического центра «Сварка» Института физики прочности и материаловедения (ИФПМ) СО РАН, доктору технических наук Сараеву Юрию Николаевичу.

Ю. Н. Сараев в 1971 г. окончил Томский политехнический институт, работал в его лаборатории «Автоматизация сварочных процессов НИИ автоматики и электромеханики», а затем после перевода лаборатории на кафедру «Оборудование и технологии сварочного производства» работал в должности ассистента, старшего преподавателя, доцента. В 1982 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. С 1986 г. работает в ИФПМ СО РАН. В 1995 г. — защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по теме: «Разработка адаптивных импульсных технологических процессов сварки и наплавки».

Ю. Н. Сараев — один из ведущих специалистов РФ в области систем питания и автоматического управления дугowymi сварочными и наплавочными процессами.

Под руководством Ю. Н. Сараева в ИФПМ СО РАН создано и успешно развивается новое научное направление, связанное с разработкой адаптивных импульсных технологических про-

цессов сварки и наплавки, обеспечивающих получение неразъемных соединений с гарантированно высокими характеристиками прочности применительно к сварным конструкциям ответственного назначения, деталям машин и механизмов, работающим в сложно-климатических условиях Западно-Сибирского региона. В рамках указанного направления осуществлялись следующие работы:

разработка и исследование адаптивных импульсных технологических процессов сварки и наплавки для получения неразъемных соединений конструкций и изделий ответственного назначения: магистральные нефте- и газопроводы, сосуды, работающие под давлением, сварка цветных металлов, судостроение, объекты энергетики, автомобильный и железнодорожный транспорт;

разработка мобильных средств ремонта вооружения и военной техники способами сварки, наплавки, резки;

разработка и исследование систем питания и автоматического управления для дуговой, плазменной и электрошлаковой сварки и наплавки.

Он является автором и соавтором более 155 научных работ, в том числе трех монографий и 37 авторских свидетельств, в 2004 г. награжден Грамотой РАН за разработку высокоэффективных технологических процессов сварки.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка»

СВАРИВАЕМОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. П. ЛИТВИНОВ, канд. техн. наук. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
В. В. ДЕРЛОМЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены этапы развития представления о свариваемости: критерии, принципы и методы ее оценки. Появление сложнолегированных материалов требует нового научного подхода к оценке свариваемости. Показана связь и влияние свариваемости на работоспособность сварных соединений. Проанализированы различные принципы качественной и количественной оценки свариваемости, в том числе с учетом агрегатного состояния вещества в зоне сварки, способов осуществления процесса, введения и расхода энергии. Приведен комплекс факторов, которые должны учитываться при оценке свариваемости.

Ключевые слова: история сварки, сварка плавлением, качество сварки, свариваемость, соединяемость, деградация свойств, критерии свариваемости, работоспособность

До настоящего времени основной проблемой сварки была пригодность металлов к образованию соединения при разных технологических приемах. Известно, что бронзовые детали соединяются заливкой перегретого металла, а кузнечной сваркой их соединить нельзя, элементы изделий из металлов на основе железа сваривали с приложением давления, так как тепловой энергии на основе угля и дерева для расплавления было недостаточно. Обеспечение эксплуатационной прочности сооружений, машин и других изделий всегда было одной из главных забот проектировщиков и изготовителей. Уже в конце XIX в. обнаружили, что в цельносварных конструкциях наименее прочными являются сварные швы или участки вблизи них. Причиной хрупкости металла шва, сваренного угольной дугой по способу Н. Н. Бенардоса, было науглероживание, а при соответствующей структуре пламени с помощью ацетилено-кислородной сварки того же металла выполняли швы лучшего качества. Таким образом, была установлена зависимость качества шва (термин «свариваемость» еще не употреблялся) от состава среды в зоне сварки. Н. Г. Славянов, применив при дуговой сварке металлургические флюсы, смог сделать «свариваемыми» почти все известные в то время технические сплавы [1]. Н. Н. Бенардос предложил несколько вариантов улучшения качества металла шва, в том числе применение внешнего магнитного поля, проковки, песка, горючего газа [2].

Широкие возможности для улучшения качества открыло изобретение шведским инженером О. Кельбергом плавящегося электрода, покрытого веществами, которые защищали и ионизировали

зону сварки [3]. В течение последующих десяти лет в Великобритании (А. Строменгер, Э. П. Джонс), США (Д. Стресау, О. Андрус) начали вводить через покрытие легирующие элементы [4]. Так определились два пути улучшения качества металла шва — физико-механическое воздействие на шов и химико-металлургическое на ванну [5].

До настоящего времени продолжают развиваться металлургические методы улучшения качества металла сварного шва. В частности, для дуговых видов сварки создаются высококачественные покрытия штучных электродов, флюсы, наполнители и новые конструкции порошковых проволок, разнообразные смеси защитных газов и др. «Высокая эффективность, низкая стоимость и универсальность дуговых способов сварки способствовали широкому развитию и применению их для соединения сначала простых сталей на основе железа, затем сложнолегированных и, наконец, сплавов различных металлов. С использованием электрической дуги, которая сегодня доминирует среди других источников локального нагрева, выполняется абсолютное большинство сварочных работ (возможно, более 80 %). В условиях сварки плавлением соединения материалов происходит путем их расплавления, т. е. через жидкую фазу» [6].

Одновременно с появлением новых технологий разрабатывали соединения, узлы и конструкции, в которых учитывали преимущества новых материалов. В первом патенте Н. Н. Бенардос предложил новые виды соединения, в том числе ячеистые и решетчатые конструкции [7].

О. Кельберг и специалисты Великобритании реализовали преимущества сварки при разработке и строительстве небольших судов. В 1930-х годах стала использоваться сварка конструкций ДнепроГЭСа, «Азовстали», мостов, зданий, судов и других ответственных сооружений, что способствовало ускорению индустриализации СССР. Тог-

да В. П. Вологдиным, Г. А. Николаевым, Н. О. Окербломом, Е. О. Патеном, Г. П. Передерием были созданы удачные сварные конструкции. Крупные цельносварные сооружения, образцы транспорта, энергетического оборудования изготавливали за рубежом по проектам О. А. Керенского, А. Р. Муна, Дж. Дердена, Х. О. Нейла, Дж. С. Гудвина и др. При этом обеспечение хорошего эксплуатационного качества достигалось путем совершенствования технологии сварки.

В 1937 г. в СССР впервые дано официальное определение свариваемости как «свойство металлов давать доброкачественные соединения при сварке, характеризующиеся степенью непрерывности и гомогенности металла шва и прилегающих зон основного металла» [8].

Качество металла, в том числе и конструкционной стали, проверяли по критериям, разработанным еще для соединений заклепками или болтами. При этом показатели прочности могли быть удовлетворительными при различном (часто неконтролируемом) содержании компонентов. Ряд аварий сварных конструкций, в том числе мостов через канал Альберта в Бельгии в 1938 г., заставил вплотную заняться проблемами свариваемости. Был дан толчок к изучению особенностей поведения металла в ЗТВ, его структурных превращений, расслоению, деформаций, напряжений и др. Банк данных о «самопроизвольном» разрушении сварных конструкций продолжал пополняться в начале второй мировой войны, в том числе и информацией об авариях американских сухогрузов типа «Либерти» в 1940–1943 гг. [9].

В конце 1940-х годов специалисты ряда стран способность металла к свариваемости проверяли при сварке различных образцов по склонности к образованию трещин [10].

За основу количественной характеристики свариваемости стали Дж. Дирден и Г. О'Нейл в 1940 г. предложили углеродный эквивалент [4]. Формула, учитывающая относительное влияние основных примесей, вошла в учебники и до сих пор служит основой количественной оценки, корректируется и дополняется по мере разработки новых сплавов. В то же время продолжались поиски и других критериев. Однако большинство идей основывалось на металлографических исследованиях различных зон сварного соединения, причем эти методики касались не только сплавов железа с углеродом и другими элементами, но и ряда других конструкционных материалов [11].

Характерным примером зависимости свариваемости от условий сварки (способа, параметров режима, геометрии соединения) можно считать историю сварки броневых сталей в начале 1940-х годов. Броневые плиты толщиной несколько десятков миллиметров корпусов танков в СССР, США и других странах, а также корабельной бро-

ни в Германии соединяли многослойными швами ручной дуговой сваркой, как правило, стальными электродами с повышенным содержанием никеля, т. е. эти стали были свариваемыми. Переход на автоматическую сварку удался в результате использования проволоки с низким содержанием серы [12] (следует отметить, что проволоку изготавливали из стали, в которой практически отсутствовала сера, поскольку часть уральских домен работала на древесном угле).

В 1940-х–начале 1950-х годов в ряде стран прошло обсуждение проблем свариваемости и надежности сварных конструкций. В 1946 г. критерии свариваемости рассмотрел в журнале «Автотенное дело» У. М. Кузмек [10]. На страницах журнала развернулась дискуссия о причинах трещинообразования и хрупких разрушений, особенностях плавления металла ванны и структурных превращений, а также по другим проблемам, связанным со свариваемостью, улучшением качества сварных соединений и надежностью сварных конструкций. В этот же период учеными ряда стран исследовалось влияние качества основного металла на качество сварных соединений.

В частности, в ИЭС им. Е. О. Патона было обращено внимание на сульфидные включения в прокате, располагающиеся послойно и раскрывающиеся в металле ЗТВ. Отмечено, что склонность к образованию околошовных трещин возрастает с увеличением толщины свариваемого металла при наличии в нем крупнозернистой исходной структуры и явно выраженной строчечности [13] (этого не происходило при клепке).

В 1950-е годы окончательно сформировалось представление о сварке как о сложном комплексе металлургических и физико-химических процессов, протекающих в условиях значительной концентрации энергии, интенсивном нагреве и последующем сравнительно быстром охлаждении. В этот период преобладало мнение о том, что «свариваемость» даже определенного конкретного металла нельзя рассматривать вне условий изготовления этого материала, проектных решений при производстве конструкций, условий эксплуатации изделия, технологии сварки и послесварочной обработки. Задачей сварщиков оставалась разработка технологий, расширяющих номенклатуру свариваемых сплавов, а также снижение энергоемкости процесса и материалоемкости конструкций.

Со второй половины XX в. появились новые конструкционные материалы с высокой прочностью, хладостойкостью, жаропрочностью, радиационной стойкостью и др. В процессе сварки происходит быстрая смена термических циклов, часто связанных с остаточными напряжениями. При этом в зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ) в основном металле может коренным образом изменяться микроструктура, что, как правило,

ухудшает эксплуатационные характеристики изделия несмотря на локальный характер изменений.

Для многих сплавов (не только цветных металлов, но и высоколегированных) классическая формула оценки свариваемости по углеродному эквиваленту оказалась некорректной. Большинство исследователей в качестве критерия свариваемости начали использовать структурные превращения. Однако этот показатель был сложным и требовал уточнений для каждой группы новых сплавов.

Еще один аспект свариваемости рассмотрел Н. Н. Прохоров в 1952 г. в монографии, посвященной исследованиям горячих трещин [14]. Он определил температурный интервал потери пластических свойств металла сварного шва и сформулировал гипотезу технологической прочности кристаллизующегося металла. За критерий прочности кристаллизующегося металла (названный технологическим интервалом хрупкости) был принят интервал температур, в котором прочность и пластичность металла имеют минимальные значения.

Однако сварка высококонцентрированными источниками энергии (лучевыми, сжатой дугой) не всегда предпочтительна для улучшения свариваемости. Так, при высокой скорости сварки ряда титановых сплавов (и соответственно интенсивном охлаждении) в металле ЗТВ происходит существенное упрочнение и потеря вязкости [15].

При сварке ТИГ и изменении параметров режима, но сохранении постоянного значения q/v склонность коррозионностойких аустенитных сплавов к образованию трещин изменяется, что связывают с формой сварочной ванны и распределением напряжений. При электронно-лучевой и лазерной сварке сопротивляемость металла к образованию горячих трещин повышается [16].

Весьма разнообразны характеристики свариваемости жаростойких сплавов. По мнению ряда исследователей, способы и режимы сварки не оказывают существенного влияния на механические свойства сварных соединений [17].

В 1960-х годах были созданы высоколегированные двухфазные стали с повышенной стойкостью в агрессивных средах. В 1970-х годах в ИЭС им. Е. О. Патона, Физико-техническом институте низких температур, НПО «Криогенмаш» и ЦНИИ им. И. П. Бардина выполнен большой объем исследований, разработаны составы и технологии производства сталей для конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах, в том числе в ракетно-космической отрасли [18].

Тенденции использования в конструкциях ответственного назначения высокопрочных сталей продолжают усиливаться. В 1970-х годах углеродистые и низколегированные стали начали заменять мартенситно-бейнитными сталями с пределом текучести до 950 МПа. У этих сталей обна-

ружили склонность к замедленному разрушению, для повышения качества соединений использовали различные режимы подогрева. Показатель свариваемости таких сталей (по эквиваленту углерода) был высок из-за уровня содержания углерода и таких легирующих элементов, как хром, никель, молибден, бор и др. [19].

Возрос объем применения нового поколения высокопрочных сталей, свариваемость которых улучшена путем снижения содержания углерода (до 0,12 %) и традиционных легирующих элементов (в сумме не более 3...4 %). Литые жаропрочные никелевые сплавы несмотря на высокие эксплуатационные качества (жаропрочность) применяются ограничено из-за высокой склонности сварных соединений к образованию горячих трещин [20]. Аустенитные хромомарганцевые стали 03X13AG18 (ЧС-36) и 07X13AG20 (ЧС-46) как заменители стали 12X18H10T хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации различных сварных конструкций криогенной техники, в химическом машиностроении и при их использовании в энергетическом оборудовании [21].

Склонность сталей и сплавов к образованию околошовных трещин предложили оценивать с помощью различных технологических проб путем подсчета суммарной длины трещин на единицу длины линии сплавления и в поперечном сечении шва [22].

И. Ито и К. Бессю вывели параметрическое уравнение, которое оценивает чувствительность сварных соединений сталей к образованию холодных трещин [23]. На основании результатов испытаний на склонность к образованию трещин методом вставок и проб «Тэккен» Ф. Р. Кое [24] вывел еще одно уравнение, считая, что одним из критериев, указывающих на возможное охрупчивание металла ЗТВ из-за структурных превращений, является твердость. Сталь, значение углеродного эквивалента которого выше, чем 0,40...0,45, по-прежнему считается чувствительной к образованию холодных трещин при сварке.

Однако способы определения свариваемости материала, основанные на применении технологических проб, часто некорректны, поскольку не соответствуют условиям сварки реальных узлов. Геометрия большинства из технологических образцов обуславливает появление горячих трещин именно в металле шва, что способствует снижению деформаций и уменьшению вероятности образования трещин в околошовной зоне [25].

Одним из основных показателей свариваемости хромоникелевых сталей является сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин. Оценку склонности их к образованию горячих трещин оценивают по результатам сварки кольцевого валикового шва на квадратном образце, составленном из четырех плоских брусков

(50×50×15 мм). Металл швов на исследованных хромоникелевых сталях, сваренных электронным лучом, менее склонен к образованию горячих трещин, чем таковой при выполнении сваркой плавящимся электродом в среде инертного газа [26].

В итоге при оценке свариваемости сталей исходят из того, что сварное соединение должно быть прежде всего сплошным, т. е. без макро- и микротрещин, не иметь проваров, пор, шлаковых включений и т. д. Свариваемость стали определяется не только внутренними, но и внешними факторами. К последним относятся технология сварки, жесткость сварного узла и др. Наконец, свариваемость обуславливается и комплексом требований, предъявляемых к сварному соединению при эксплуатации, т. е. оно должно отличаться необходимой совокупностью полезных свойств. Неудачные конструкции соединений и узлов, наличие концентраторов напряжений, остаточных внутренних напряжений, являющихся серьезной причиной разрушения сварных конструкций, рассматриваются как факторы, влияющие на прочность изделий. Поэтому поиск конструктивных решений и технологий также связывают со свариваемостью [27].

Снижение остаточных напряжений, исключение концентраторов повышает уровень сопротивления зарождению и развитию усталостных и хрупких разрушений [28].

Поиску оптимальных технологий дуговой сварки под флюсом низколегированных сталей посвящены исследования, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством И. К. Походни. Было установлено, что измельчение зерна в участке перегрева ЗТМВ, уменьшение его ширины, сокращение длительности пребывания металла в температурной области распада аустенита и уменьшение степени гомогенности остаточного аустенита можно добиться при сварке на постоянном токе пульсирующей дугой. Проанализировав работы, посвященные металлургическим способам повышения стойкости металла шва при сварке в защитных газах, и выполнив собственные исследования, В. Н. Липодаев, В. П. Елагин и другие сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона показали, что добавка небольшой массовой доли азота и кислорода (3 %) оказывает на аустенитный металл как аустенизирующее, так и модифицирующее влияние [29].

Для повышения пластичности сварных соединений высокопрочных сталей в США предложено наплавлять «мягкие» валики по линии сплавления глубиной 1...2 мм, переплавляя металл шва на ширину 2...3 мм (Пат. 3484930 США, кл. 29497). С целью повышения пластичности при сохранении достаточной прочности в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны технологии оплавления границ шва с применением процесса ТИГ [27].

В НТУУ «Киевский политехнический институт» (В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов и др.) разработано оборудование и технологии воздействия магнитными полями на процессы при дуговой сварке, что способствовало повышению стойкости металла швов против образования трещин и пор. В частности, внешнее электромагнитное воздействие, согласованное с импульсной подачей присадочной проволоки, улучшило показатели свариваемости никелевых сплавов [30].

С конца 1950-х годов по мере расширения объемов применения высокопрочных алюминиевых сплавов в производстве ответственных конструкций одним из первостепенных факторов свариваемости становится расслоение полуфабрикатов в ЗТМВ — «наследственность» технологий литья и обработки давлением. С целью получения высококачественных сварных соединений одновременно с разработкой составов новых высокопрочных сплавов (алюминий-литиевых, алюминий-иттриевых и др.) ведется поиск технологий обработки слитков и полуфабрикатов. Известно, что на свариваемость таких сплавов влияют режимы отжига и гомогенизации, а способы, параметры и техника сварки должны устанавливаться из условия сохранения свойств основного металла и удовлетворения особым требованиям каждого конкретного изделия [31].

Применив для сварки конструкций ракет-носителей из крупногабаритных поковок алюминиевого сплава 1201 источники с высокой концентрацией энергии (электронный луч, дуговую плазму), В. А. Казакову, В. Н. Мироненко и другим ученым (ЦНИИ машиностроения) удалось повысить уровень механических свойств сварного соединения независимо от направления волокна [32].

В последние годы делались попытки найти критерии оценки свариваемости комплекснолегированных алюминиевых и титановых сплавов. Так, В. А. Фроловым (МАТИ) разработана методика критериального многофакторного подхода к оценке свариваемости материалов, уровня технологии производства, его сертификации и технологичности изделий. По этим комплексным критериям предлагается проводить количественную оценку свариваемости материалов, критерии могут дополняться, а их структура уточняться на основе физико-математического и компьютерного моделирования сварочных процессов [33].

Поведение других цветных сплавов при изменении условий сварки плавлением теоретически непредсказуемо и определяется только экспериментально. Например, при сварке сплава цирконий–2,5 % ниобия охлаждение со скоростью 1,3...5 К/с способствует формированию равновесных и закалочных фаз. Увеличение скорости охлаждения до 45...1000 К/с приводит к образо-

ванию в сплаве наиболее однородного структурного состояния закалочного типа [34].

Успех применения композиционных материалов в значительной степени зависит от решения проблемы соответствия соединения всем критериям свариваемости. Причем самой трудной задачей является разработка технологий сварки плавлением. Выполненные Т. А. Чернышевой и другими учеными в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (Москва) опыты по сварке МИГ композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава АЛ2, армированного частицами карбида кремния, показали удовлетворительное формирование сварного шва и отсутствие грубых макродефектов (подрезов, несплавлений, трещин), возможность сохранения в сварном шве армирующего наполнителя. При кристаллизации сварочной ванны, содержащей частицы SiC, формируются три основные зоны с разной наполненностью частицами. Ширина зон и размер структурных элементов в этих зонах зависят от режима сварки. Уменьшение погонной энергии сварки приводит к лучшему распределению армирующего наполнителя в металле матрицы сварного шва, большим дисперсности ячеисто-дендритной структуры матрицы и твердости металла сварного шва [35].

Кроме металлургических проблем усилилось внимание к точности размеров и внутренним напряжениям. Задачи снижения усадки и коробления сварных соединений вызваны расширением диапазона нагрузок, температур и других условий эксплуатации сварных конструкций нового поколения. Одним из путей решения такого комплекса проблем, как уменьшение ЗТМВ и снижение деформаций, стала разработка процессов сварки концентрированными источниками нагрева — дуговой плазмой, электронным лучом, лазером, световым лучом. В последние годы разрабатываются гибридные процессы, основанные на взаимодействии в зоне сварки двух разных источников нагрева. Поскольку большинство технологий, основанных на этих процессах, выполняются в инертной среде или вакууме, можно считать, что металлургическое воздействие уменьшается. Тем не менее, температурно-силовые особенности воздействия конкретной технологии необходимо учитывать при разработке новых материалов, которые будут подвергаться сварке комбинированными источниками нагрева.

В работе [36] отмечено, что при аттестации технологии необходимо основываться не на наличии или отсутствии нежелательных фаз или составляющих микроструктуры, а на свойствах соединения, соответствующих эксплуатационным требованиям к изделию, в первую очередь прочностным показателям в условиях эксплуатации.

Разработка технологий, обеспечивающих свариваемость сплавов новых поколений (комплекснолегированных, термоупрочненных сталей, суперсплавов, сплавов алюминий-литиевых, титановых и других материалов) является важной ступенью на пути создания ответственных инженерных конструкций, увеличения эксплуатационной надежности и долговечности. Причем и в начале XXI в. выбор способов сварки остается сравнительно невелик. Если исключить способы сварки давлением, не пригодные для полного, законченного изготовления многих конструкций (особенно крупногабаритных объемных со сложной геометрией), сварка плавлением ограничивается дугowymi, лучевыми и гибридными технологиями. Эта традиционная классификация, принятая еще в начале 1930-х годов, в принципе не могла служить основой или хотя бы составляющей количественной характеристики свариваемости, потому что не учитывает разнообразие физических процессов и состояние вещества при взаимодействии источника энергии и материала. В последние годы была предложена классификация процессов сварки с учетом агрегатного состояния вещества. В соответствии с этим положением сварочные технологии становятся в один ряд с технологиями изготовления конструкций (выплавкой, литьем, прокаткой, термообработкой и др.), физическое формирование которых также осуществляется через изменение агрегатных состояний. Учет агрегатного состояния вещества в зоне сварки (жидкое, твердое, парообразное) необходим для качественной и может служить основой для количественной оценки соединяемости (свариваемости). Такой подход может быть использован для оценки новых вероятных технологий, способов соединения металлических и неметаллических материалов [6].

Основным критерием качества сварного изделия сварного соединения становится определение «свариваемости». IX Комиссией МИС «Поведение материалов при сварке» рассмотрено определение свариваемости, предложенное Х. Гранжомом. В мае 1967 г. оно было утверждено рекомендацией ISO R 581, на основе которой принят стандарт ISO 581–1980. Однако в 1984 г. в СССР в новом терминологическом ГОСТ 2601–84 сохранился тот же смысл, по сути, не допускающий возможность плохой свариваемости: «Свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия». В 1998 г. на термин «свариваемость» был введен стандарт Украины ДСТУ 3761.1–98 (основанный на ISO 581–1980). В работе [37] проведен анализ существующих подходов к оценке «свариваемости» по стандартам различных стран и организаций, таких как ISO 581–1980, DIN 8528 Германия, Британ-

ский институт сварки, Братиславский институт сварки, ГОСТ 2601–84 СССР, ДСТУ 3761.1–98 Украина, Американское сварочное общество и т. д. Были сделаны выводы:

в абсолютном большинстве случаев «свариваемость» оценивается качественно и субъективно по принципу «есть–нет» (т. е. материал свариваемый или нет);

в некоторых случаях утверждается, что «свариваемость» — это свойство (способность) металла образовывать соединение. При этом не указывается, что это за свойство и как его оценить. Такой подход также является субъективной оценкой;

практически во всех определениях, регламентирующих термин «свариваемость», упоминается, что необходимы «соответствующий технологический процесс» или «определенный процесс и определенная технология», или «подвергается сварке любым способом» и без специальных мер (правда, это в случае совершенной свариваемости), или «при установленной технологии», или при «соответствующей процедуре сварки», т. е. о влиянии технологии как таковой на свариваемость лишь упоминается. Рекомендации об учете влияния технологии на свариваемость носят условный характер;

во всех случаях в том или ином виде «свариваемость» связывается с «собственным качеством свариваемых деталей и конструкций, которую они образуют» или «сварные швы должны удовлетворять соответствующим требованиям по свойствам и влиянию на конструкцию», или «получения соединения, свойства которого позволяют полностью использовать материал», или «сварное соединение должно отвечать требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия». Во всех случаях не приводятся методология и критерии оценки свариваемости, а если и приводятся, то носят не универсальный характер и справедливы только для некоторых узких классов материалов, т. е. и в этих определениях также просматривается субъективная система оценки.

Высказана целесообразность разработки универсального физического подхода и критерия оценки свариваемости различных по своей природе материалов — металлов, сплавов, керамики, композитов, полимеров, живых тканей и т. д. Можно утверждать, что такая характеристика материала как «свариваемость» должна иметь связь с изменениями его функциональных свойств. Эти изменения характерны для процессов деградации материалов под воздействием технологии образования неразъемного соединения. В технике все больше начинает использоваться термин «соединяемость». Они имеют одинаковый физический смысл с точки зрения образования неразъемного соединения. Делается также вывод, что свариваемость можно оценивать степенью деградации материала [38].

Выводы

1. В 1937 г. впервые дано определение свариваемости как свойства металлов давать доброкачественные соединения при сварке, характеризующееся степенью непрерывности и гомогенности металла шва и прилегающих зон основного металла. Качество металла, в том числе и конструкционной стали, проверялось по критериям, разработанным еще для соединений заклепками или болтами при различном (часто неконтролируемом) содержании компонентов.

2. За основу количественной характеристики свариваемости стали Дж. Дирден и Г. О'Нейл в 1940 г. предложили расчетный показатель, так называемый углеродный эквивалент, который определяется по формуле, учитывающей содержание элементов. В последующие годы по мере разработки новых сплавов формула продолжала корректироваться и дополняться.

3. В 1940-х годах на страницах журналов ряда стран развернулась дискуссия о причинах трещинообразования и хрупких разрушений, об особенностях плавления металла ванны и структурных превращений, а также по другим проблемам, связанным со свариваемостью, улучшением качества сварных соединений и надежностью сварных конструкций. Е. О. Патон обратил внимание на то, что свариваемость сплавов ухудшается при наличии в полуфабрикатах крупнозернистой структуры и сильно выраженной строчечности, в частности, сульфидных включений, располагающихся в прокате послойно.

4. В 1967 г. IX комиссией МИСа выработана рекомендация ISO R 581 по формулировке свариваемости, на основе которой приняты действующие стандарты ISO 581–1980 и ДСТУ 3761.1–98.

5. На данный момент общепринятое определение свариваемости материала отсутствует, даже в национальных и международных стандартах, действующих сегодня, не указываются критерии и методы оценки свариваемости.

6. В ИЭС им. Е. О. Патона предложена [6] классификация процессов сварки по агрегатному состоянию вещества в месте образования шва. Учет агрегатного состояния вещества в зоне сварки (жидкое, твердое, парообразное) необходим для количественной оценки соединяемости (свариваемости).

7. Наиболее объективным и перспективным критерием оценки свариваемости как свойства материала является степень деградации, которая позволяет оценивать любой вид материалов и технологий их соединения [38].

1. Бенардос Н. Н. Научно-технические изобретения и проекты // Избранные труды. — Киев: Наук. думка, 1982. — 239 с.
2. Славянов Н. Г. Труды и изобретения. — Пермь: Перм. кн. изд-во, 1968. — 299 с.

3. Kjellberg O. Elektrisches schweissen // ESAB-Schriften. — 1967. — № 53. — С. 430–434.
4. Simonson R. D. The history of welding. — Monticello Books, Morton Grove, 1969. — 420 p.
5. Hopkins R. K. Physical properties of fusion-welded joints // J. of American Welding Soc. — 1935. — № 3. — P. 4–7.
6. Ющенко К. А. Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 39–44.
7. Бенардос Н. Н. Способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока: Привилегия России № 11982. — Выдана Департаментом торговли и мануфактур 31 дек. 1886 г.
8. Терминология сварки металлов // Бюл. комиссии технической терминологии / Под ред. С. А. Чаплыгина и Д. С. Лотте. — М.: Изд-во АН СССР, 1937. — Вып. XVIII, 23, п. 69. — 30 с.
9. Davis A. F. The saga of welded ships // Welding J. — 1945. — № 1. — P. 30–32.
10. Кузнецов У. М. Свариваемость стали // Автогенное дело. — 1946. — № 8/9. — С. 18–22.
11. Houldcroft P. T. Steps in welding innovation and achievement // Metal Constr. and Brit. Weld. J. — 1973. — № 11. — P. 443–450.
12. А. с. СССР 64057. Способ дуговой автоматической сварки под слоем флюса / Б. А. Иванов, В. И. Дятлов. — Заявл. 29.05.1942 // Открытия. Изобрет. — 1944. — № 7/8. — С. 39.
13. Патон Е. О., Шверницкий В. В. Сталь для сварных мостов // Тр. по автоматической сварке под флюсом. — 1949. — № 6. — С. 3–7.
14. Прохоров Н. Н. Горячие трещины при сварке. — М.: Машгиз, 1952. — 220 с.
15. Ивасишин О. М., Ошкадеров С. П. Влияние скорости нагрева под закалку на структуру сплавов ВТ23 и ВТ6 // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1982. — № 37. — С. 14–16.
16. Goodwin G. M. The effects of heat input and weld process on hot cracking in stainless steel // Welding J. — 1988. — № 4. — P. 88–94.
17. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Свароч. пр-во. — 1997. — № 4. — С. 4–11.
18. Ющенко К. А. Проблемные вопросы в области сварки криогенных конструкций // Криогенные материалы и их сварка: Докл. междунар. конф. — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 172–180.
19. Лобанов Л. М., Миходуй Л. И., Гордонный В. Г. Состояние и перспективы применения в сварных конструкциях высокопрочных сталей с улучшенной свариваемостью // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 29–34.
20. Некоторые закономерности образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, Н. И. Саволей, Ю. Д. Панфилов // Там же. — 1993. — № 3. — С. 13–16.
21. Жаропрочность сварных соединений стали 07X13Al20 / К. А. Ющенко, А. М. Понизовцев, В. В. Фомин, Р. И. Морозова // Там же. — 1981. — № 9. — С. 67.
22. Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
23. Ito Y., Bessyo K. Weldability formula of high strength steels related to heat-affected-zone cracking. — S. 1., [1968]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. C-IX-576–68).
24. Coe F. R. A survey of knowledge of the sources, distribution and movement of hydrogen in weld metal. — S. 1., [1969]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. C-II-512–69).
25. Якушин Б. Ф., Эйдельштейн В. Е. Использование технологических проб для оценки склонности никелевых сплавов к образованию околошовных трещин при сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 7. — С. 28.
26. Зыбко И. Ю. Оценка свариваемости хромоникелевых сталей электронным лучом в вакууме // Там же. — 1973. — № 3. — С. 5–7.
27. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. — Киев: Техніка, 1970. — 188 с.
28. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
29. Влияние азота и кислорода на стойкость аустенитных швов разнородных сварных соединений против образования горячих трещин / В. Н. Липодаев, В. П. Елагин, В. В. Снисарь, Н. И. Саволей // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 8–11.
30. Сварка электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман, Г. М. Шеленков / Под ред. В. П. Черныша. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
31. Ищенко А. Я. Свариваемость современных высокопрочных алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 18–22.
32. Мироненко В. Н., Сошко И. Ф., Казаков В. А. Свариваемость крупногабаритных поковок из сплава 1201 // Свароч. пр-во. — 1983. — № 12. — С. 19–21.
33. Фролов В. А. Комплексные исследования и повышение уровня конструктивно-технологического проектирования и технологии изготовления сварных изделий новой техники двойного назначения из алюминиевых и титановых сплавов. — М.: Изд-во МГУП МАТИ, 2002. — 185 с.
34. Термокинетическая диаграмма структурных превращений сплава цирконий–2,5 % ниобия в литом и деформированном состоянии / А. Б. Гончаров, В. Г. Васильев, В. Ф. Грабин, Л. И. Адеева // Автомат. сварка. — 1993. — № 7. — С. 23–26.
35. Дуговая сварка дискретно армированного композиционного материала системы Al–SiC / Т. А. Чернышева, Л. К. Болотова, Л. И. Скобелева, Г. Г. Чернышов // Физ. и химия обработки материалов. — 1999. — № 4. — С. 57–62.
36. Karlson L. Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steel and weld metals: metallurgy, influence on properties and welding aspects // Welding in the World. — 1999. — № 5. — P. 20–41.
37. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Анализ современных представлений о свариваемости // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 9–13.
38. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Зварюваність та зміни фізико-механічних властивостей зварних з'єднань // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 2. — С. 89–93.

Considered are the stages of development of the weldability notions: criteria, principles and methods for its evaluation. Emergence of multiple-alloyed materials requires a new scientific approach to the evaluation of weldability. The relationship with and effect of weldability on performance of welded joints are shown. Different principles, as well as qualitative and quantitative evaluations of weldability are analysed: including with allowance for the aggregate state of a material within the welding zone, methods for implementation of the process, and energy input and consumption. The set of factors to be taken into account in evaluation of weldability is presented.

Поступила в редакцию 16.06.2008



НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЛАВКИ КОНУСОВ И ЧАШ ЗАСЫПНЫХ АППАРАТОВ

А. П. ЖУДРА, канд. техн. наук, А. П. ВОРОНЧУК, А. А. ФОМАКИН, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. И. ВЕЛИКИЙ, инж. (ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан новый наплавочный аппарат А-1812 и система управления на базе микропроцессора применительно к установкам типа У-50, У-75 и У-125. Оборудование предназначено для наплавки деталей засыпных аппаратов доменных печей. Приведены технические характеристики нового оборудования и его особенности.

Ключевые слова: дуговая наплавка, порошковая лента, засыпной аппарат, установка, наплавочный аппарат, система управления, информационно-регистрирующая система

В настоящее время на многих металлургических предприятиях эксплуатируется загрузочное устройство доменной печи классической конструкции — двухконусный засыпной аппарат, который состоит из больших конуса и чаши, воронки и малого конуса. Эти основные детали, предназначенные для распределения шихты по объему доменной печи, являются также клапанными устройствами для поддержания заданного давления под колошником. При интенсификации доменного процесса, обусловленного ростом избыточного давления и температуры, стойкость засыпных аппаратов резко снижается. Замена засыпного аппарата является дорогостоящей операцией, а кроме того, остановка доменной печи на капитальный ремонт 3-го разряда не менее чем на трое суток приводит к значительным потерям, связанным с выплавкой чугуна. Увеличение срока службы засыпных аппаратов достигается благодаря упрочняющей наплавке.

Различные участки конусов и чаш засыпных аппаратов работают в неодинаковых условиях, в связи с чем их можно условно разделить на два основных вида: защитная поверхность (по ней перемещаются шихтовые материалы и она подвержена абразивному износу) и контактная поверхность (служит запорным газовым устройством и подвержена газоабразивному износу). Следует отметить, что для наплавки одного комплекта засыпного аппарата расходуются несколько тонн электродного материала, а поэтому важными факторами являются автоматизация процесса наплавки и его производительность.

Упрочнение конусов и чаш доменных печей начинали с наплавки контактных поверхностей штучными электродами, обеспечивающими полу-

чение металла наплавленного слоя типа «Сормайт-1». Низкая производительность процесса наплавки и незначительная толщина наплавленного слоя не способствовали увеличению стойкости данных деталей до требуемого уровня. Использование порошковых проволок также не дало ожидаемого результата.

Разработка в ИЭС им. Е. О. Патона нового электродного материала — порошковой ленты — коренным образом изменила ситуацию [1]. Ее применение позволило значительно увеличить производительность процесса наплавки (до 25 кг наплавленного металла за 1 ч) и получить слои наплавленного металла с высокой степенью легирования. Для более полной реализации открывшихся возможностей создали новое наплавочное оборудование и технологию наплавки деталей доменного оборудования [2].

Для широкослойной наплавки одной и двумя лентами конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей разработаны уникальные установки У-50, У-75 и У-125, состоящие из манипуляторов грузоподъемностью 50 или 75 т и передвижной колонны, на которой смонтирован специализированный наплавочный аппарат. Последний обеспечивает поперечные колебания электрода, а с помощью манипулятора изделие перемещается на шаг наплавки. Конструкцией установок предусмотрено выполнение наплавки по кольцу, а также сварки крупногабаритных деталей открытой дугой и под флюсом порошковыми или цельнотянутыми проволоками.

Наплавочные установки (рис. 1) и аппарат А-1640, спроектированные и изготовленные в 1960–1970 гг., к настоящему времени уже имеют моральный и физический износ. С целью их модернизации создан новый наплавочный аппарат А-1812М (см. ниже техническую характеристику, рис. 2) и система управления типа СУ-320 для электродуговой наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей.

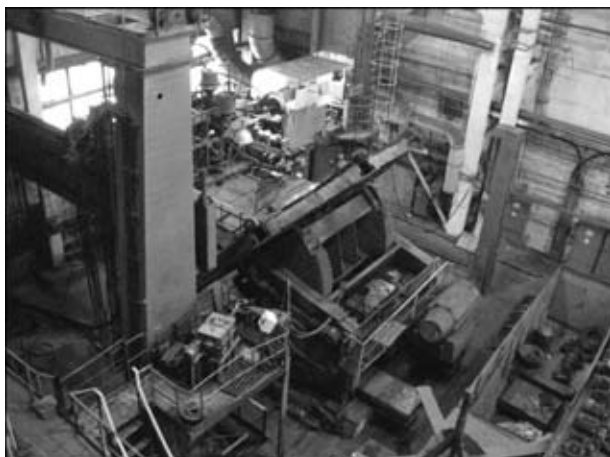


Рис. 1. Внешний вид установки У-125

Техническая характеристика аппарата А-1812М

Сечение порошковой ленты, мм	10×3, 16,5×4, 18×4
Диаметр электродной проволоки, мм	3...5
Напряжение на дуге, В	25...50
Скорость подачи электродов, м/ч	20...100
Скорость возвратно-поступательного перемещения электродов, м/ч	20...70
Ход возвратно-поступательного перемещения электродов, мм, не более	550
Горизонтальное перемещение наплавочного аппарата на салазках, мм, не более	750
ПВ, %	100

Аппарат А-1812М имеет следующие конструктивные особенности:

в состав подающих механизмов входит привод от асинхронных двигателей, который обеспечивает более равномерную подачу электродного материала;

ход штанги увеличен на 150 мм, при использовании аппарата есть возможность за счет салазок выдвигать его еще на 750 мм, что особенно важно при наплавке внутренних поверхностей большой площади;

благодаря кронштейнам подающих механизмов можно выполнять наплавку одновременно двумя дугами как последовательно (вторая дуга наплавляет второй слой), так и параллельно (наплавляемая полоса разбивается на два участка);

аппарат укомплектован шаговым устройством, которое позволяет увеличить точность перемещения упрочняемой детали на шаг наплавки и регулировать последний непосредственно с пульта управления;

в комплекте с аппаратом изготавливается система управления СУ-320, которая выполнена на базе микропроцессора и обеспечивает управление исполнительными устройствами всей наплавочной установки на основе логической обработки информации, поступающей от различных датчиков.

Отличительной особенностью новой электрической схемы является полный отказ от двигате-



Рис. 2. Внешний вид аппарата А-1812М

лей постоянного тока. Вместо них применяют асинхронные двигатели, благодаря которым есть возможность плавно регулировать скорость вращения. Схема обеспечивает вывод всех контролируемых параметров технологического процесса на экран дисплея с записью режимов наплавки в реальных координатах времени, что позволяет паспортизировать изготовление упрочняемых деталей. В этой схеме впервые для данного типа установок ввод всех параметров режима осуществляется с дисплея, расположенного на пульте управления. Существенным преимуществом нового аппарата является возможность задавать и контролировать реальную сварочную скорость при сварке и наплавке конусных деталей.

Система управления СУ-320 (далее СУ) предназначена для управления технологическим процессом наплавки и сварки конусов засыпных аппаратов доменных печей и других деталей металлургического оборудования в производственных условиях на ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» (г. Новокузнецк, РФ). СУ построена на базе комплектующих изделий производства OMRON (Япония) и состоит из следующих основных частей:

программируемого контроллера типа «CQM1H» с программным обеспечением (ПО) для управления процессом наплавки;

инверторных частотных электроприводов типа «Varispeed F7» и «Varispeed V7» для двигателей установки У-125 и аппарата А-1812М;

панели оператора (терминал) типа NT-11S для ввода технологических параметров;

пускозащитной аппаратуры, измерительных приборов и органов управления;

информационно-регистрирующей системы (ИРС) — персональный компьютер со специальным ПО для визуализации процесса и регистрации технологических параметров.

Управление оборудованием установки осуществляется с главного пульта управления (ГПУ),



расположенного на рабочей площадке сварщика, и вспомогательного пульта управления (ПУ), расположенного на вспомогательной площадке для монтажа изделия на планшайбу.

Шкафы управления с контроллером, электроприводами и пускорегулирующей аппаратурой, шкаф с силовыми контакторами и шунтами установлены в электрощитовом помещении (машинном зале) цеха.

СУ обеспечивает функционирование оборудования в трех режимах — «Наладка», «Сварка», «Наплавка». Выбор режима осуществляют с помощью переключателя на ГПУ. В режиме «Наладка» происходит проверка работы всех механизмов установки и выполнения установочных перемещений перед наплавкой. Режимы «Сварка» и «Наплавка» предназначены для автоматического управления технологическим процессом сварки и наплавки по заданной программе. На всех режимах работы обеспечивается индикация параметров на цифровых приборах и панели оператора, а также возможность оператору регулировать параметры в процессе наплавки или сварки.

Для контроля работы оборудования на панель оператора выводятся технологические и аварийные сообщения типа: «Нет тока, стоп процесс», «Отказ привода подачи», «Параметр не в пределах» и др.

ИРС для визуализации процесса и регистрации технологических параметров — это компьютер со специальным ПО, который установлен в непроизводственном помещении с нормальными атмосфер-

ными условиями. Длина кабеля связи (шкаф управления-компьютер) составляет до 150 м. ПО функционирует в среде Windows-XP и обеспечивает следующие возможности: отображение в реальном времени параметров технологического процесса; ввод оператором номера изделия, фамилии оператора и другой дополнительной информации о процессе; запись в базу данных протокола процесса; получение информации о записанных параметрах процесса из базы данных протокола; печать протокола.

ИРС отображает на экране монитора информацию и обеспечивает работу с протоколами в программе «Excel».

В создании нового оборудования участвовали сотрудники отдела № 23 ИЭС им. Е. О. Патона, ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона, ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона, ООО «ПЛАН-Т».

Наплавочные аппараты А-1812М и системы управления типа СУ-320 изготовлены и внедрены на металлургическом комбинате «Криворожсталь» в 2003 г., ОАО «Азовмаш» в 2005 г. и ремонтном предприятии ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» в 2008 г.

Новое оборудование в процессе работы продемонстрировало свою надежность, а также удобство в эксплуатации и обслуживании.

1. Юзвенко Ю. А. Порошковая электродная лента // Автомат. сварка. — 1960. — № 9. — С. 86–87.
2. Шимановский В. П., Юзвенко Ю. А. К вопросу технологии автоматической дуговой наплавки конусов и чаш // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы: Материалы Всесоюз. совещ., г. Коммунарск, сент. 1973 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1973. — С. 143–147.

New cladding equipment A-1812 and a microprocessor-based system were developed for machines of the U-50, U-75 and U-125 types. The equipment is meant mainly for cladding of blast furnace charging devices. Specifications of the new equipment are given, and its peculiarities are described.

Поступила в редакцию 10.04.2009

К 25-ЛЕТИЮ СВАРКИ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

25 июля 2009 г. исполнилось 25 лет со дня первых в мире экспериментов по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий в открытом космосе, выполненных летчиками-космонавтами СССР С. Е. Савицкой и В. А. Джанибековым. Это поистине уникальное событие навсегда вошло в историю развития космической науки и техники.

С 14 по 16 июля 2009 г. в Киеве состоялись торжественные мероприятия, посвященные этой дате. Открылись они в Большом конференц-зале НАН Украины, где состоялось торжественное собрание, в котором приняли участие дважды Герои Советского Союза летчики-космонавты СССР С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков, а также бывший руководитель отдела РКК «Энергия», ныне генеральный директор Межотраслевого научно-технического центра «Полезные нагрузки космических объектов», внесший большой вклад в осуществление данного эксперимента В. П. Никитский. В работе торжественного собрания приняли участие сотрудники научных учреждений НАН Украины, ракетно-космической отрасли и высших учебных заведений, готовящих специалистов для ракетно-космической промышленности, а также экс-Президент Украины Л. Д. Кучма, первый космонавт независимой Украины, Герой Украины Л. К. Каденюк, министр экономики Украины Б. М. Данилишин, генеральный конструктор — генеральный директор КБ «Южное» С. Н. Конюхов и др.

Открыл торжественное собрание Президент НАН Украины академик Б. Е. Патон, который приветствовал находящихся в зале участников этого уникального эксперимента, а также всех присутствующих на торжественном собрании.

В докладе, посвященном 25-летию сварки в открытом космосе, Б. Е. Патон отметил, что успешное выполнение уникальных экспериментов по сварке, резке, пайке и нанесению покрытий в условиях кос-

мического пространства показало возможность эффективного выполнения космонавтами сложных работ на борту пилотируемого орбитального комплекса в открытом космосе. Программы освоения космического пространства, осуществляемые в настоящее время и планируемые на будущее, предусматривают создание крупногабаритных космических объектов в космосе и на Луне. Естественно, что эксплуатация таких сооружений в течение длительного времени потребует проведения систематического профилактического обслуживания, а также ремонтно-восстановительных и монтажных работ как внутри герметичных отсеков, так и снаружи. Одним из наиболее перспективных технологических процессов для этих целей является сварка. Космонавтам придется работать на разных участках космического аппарата и иметь дело с различными конструкционными материалами. Для этих целей в Институте электросварки им. Е. О. Патона создан универсальный электронно-лучевой ручной инструмент (УРИ). Проведенный эксперимент свидетельствует о высоком совершенстве сварочной аппаратуры, созданной благодаря многолетней напряженной работе большого коллектива ученых и инженеров Института электросварки им. Е. О. Патона в тесном сотрудничестве с Центром подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина. Космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков проявили подлинный героизм, взяв на себя роль первопроходцев в этих основополагающих космических экспериментах. Они буквально сломали лед недоверия у скептиков, сомневающихся в возможности использования в космосе сварочных технологий. Их подвиг навсегда вошел в историю развития сварочной науки и техники. Эксперименты показали, что компактные универсальные инструменты типа УРИ позволяют космонавтам выполнять работы, связанные с ремонтом или монтажом на внешней поверхности космического



Рис. 1. Президиум торжественного собрания



Рис. 2. После беседы с сотрудниками НТУУ «Киевский политехнический институт»

ВІТАЛЬНИЙ АДРЕС
КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ

Учасникам
урочистих зборів, присвячених
25-річчю від дня запровадження технології
зварювання у відкритому космосі

Шановні друзі!

Сердечно вітаю учасників засідання з 25-річчям від дня запровадження технології зварювання у відкритому космосі.

Сьогодні ні в кого не викликає сумніву, що у 1984 році за допомогою електронно-променевого інструмента, виготовленого вченими Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона на чолі з академіком Борисом Євгеновичем Патоном, у відкритому космосі проведено експеримент світового значення.

Космічна технологія зварювання постійно вдосконалюється фахівцями інституту. Відкриваються нові можливості, створено новий інструмент плазмотрон, розпочато запровадження технології лазерно-мікроплазмового зварювання.

Майбутнє нашої держави ми пов'язуємо саме з такими інноваційними технологіями, які підвищують конкурентоспроможність вітчизняного науково-технічного потенціалу, гідно представляють українську науку у міжнародних програмах освоєння космічного простору.

Дозвольте висловити Вам щирі вдячності за самовіддану працю та визначні досягнення, що примножують науковий авторитет України у світі.

Бажаю Вам здоров'я і добра, плідної роботи та високих ідей.

Прем'єр-міністр України



Юлія ТИМОШЕНКО

14 липня 2009 р.
м. Київ

объекта с обеспечением необходимого качества сварных соединений. Космические корабли и станции, а также инфраструктура экспедиционных поселений на поверхности Луны, рассчитанные на длительную эксплуатацию в условиях космоса, дол-

жны быть оснащены комплектами сварочной аппаратуры, позволяющими выполнять монтажные и ремонтные работы при строительстве и эксплуатации объектов, а экипажи кораблей и экспедиций должны пройти обучение основам сварочных технологий и

иметь практические навыки выполнения указанных работ.

Б. Е. Патон отметил, что сварке и родственными технологиям предстоит в дальнейшем сыграть значительную роль в освоении космоса. Электронно-лучевые технологии, опробованные в открытом космосе, могут найти применение как в различных физических экспериментах, так и в производстве уникальных полупроводниковых материалов. Это позволит перейти от опытов с электронным лучом на орбитальных станциях к созданию реальных сварных объектов, например при строительстве лунных поселений и различных производств на Луне, еще в первой половине XXI в.

Летчики-космонавты СССР С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков, а также В. П. Никитский поделились своими воспоминаниями об уникальном событии — подготовке и проведении эксперимента в открытом космосе.

Затем выступил министр экономики Украины Б. М. Данилишин, который зачитал Приветствие от Премьер-министра Украины Ю. В. Тимошенко торжественному собранию.

От Совета по космическим исследованиям НАН Украины выступил заместитель председателя Совета, директор Главной астрономической обсерватории НАН Украины, академик НАН Украины Я. С. Яцкив, который отметил большое значение этого выдающегося события.

В связи с празднованием 25-летия сварки в открытом космосе Президиум НАН Украины наградил медалями НАН Украины за «Научные дости-

жения» С. Е. Савицкую, В. А. Джанибекова и В. П. Никитского, которые им вручил академик Б. Е. Патон.

Космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков, а также В. П. Никитский посетили Институт электросварки, где их принял директор Института академик Б. Е. Патон. В ходе беседы речь шла о новых разработках института в области сварки и родственных технологий, а также о достижениях сварки в области медицины. Со специалистами института обсуждались вопросы ремонтно-восстановительных и монтажных работ в открытом космосе.

Гости посетили НТУУ «Киевский политехнический институт», где состоялась беседа с первым проректором академиком НАН Украины Ю. И. Якименко, проректором чл.-кор. НАН Украины С. И. Сидоренко и др. В беседе приняли участие академики НАН Украины Л. М. Лобанов и Я. С. Яцкив. Гостям рассказали об истории этого вуза и его нынешней деятельности.

Гости побывали в аудитории, где учился создатель практической космонавтики, выдающийся конструктор советских космических систем С. П. Королев, и ознакомились с представленными здесь экспонатами. С. Е. Савицкая, В. В. Джанибеков и В. П. Никитский возложили цветы к памятникам С. П. Королева, Е. О. Патона и И. И. Сикорского, а также посетили аэрокосмический музей НТУУ «Киевский политехнический институт».

Е. А. Аснис, д-р техн. наук,
В. Ф. Шулым, Н. В. Пискун, И. И. Статкевич, инженеры

УДК 621.791.72

ОТКРЫТИЕ РОССИЙСКО-ГЕРМАНСКОГО ЦЕНТРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

3 августа в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) состоялось открытие Российско-Германского центра лазерных технологий, созданного на базе Института лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) факультета технологии и исследования материалов СПбГПУ. Целью создания Центра является поиск путей эффективного применения лазерных технологий в промышленности и научных исследованиях. Оснащение Центра самым современным оборудованием позволяет ему непосредственно участвовать в реализации конкретных проектов в авиационной и ракетно-космической отраслях, в кораблестроении, в металлургии, химическом, нефтегазодобывающем и других секторах промышленности.

В церемонии открытия Центра приняли участие ректор СПбГПУ чл.-кор. РАН проф. М. П. Федоров, ректор Университета Эрлангена-Нюрнберга проф.

Карл-Дитер Грюске, президент РКК «Энергия» чл.-кор. РАН проф. В. А. Лопота, директор Баварского лазерного центра проф. Михаэль Шмидт, директор Российско-Германского центра лазерных технологий СПбГПУ проф. Г. А. Туричин.

Выступая на презентации, почетные гости и официальные лица особо подчеркнули роль Центра в научно-образовательном и промышленном сотрудничестве между Россией и Германией.

Ректор СПбГПУ М. П. Федоров, получив из рук директора Баварского лазерного центра Михаэля Шмидта символический ключ от вновь открытого Центра, сказал: «Этот ключ будет открывать новые страницы нашего сотрудничества и никогда не будет их закрывать».

Ректор Университета Эрлангена-Нюрнберга проф. Карл-Дитер Грюске: «Мы были рады работать над созданием этого Центра вместе с российскими



Выступление президента РКК «Энергия» чл.-кор. РАН В. А. Лопоты

коллегами. Этот проект объединил усилия Министерства образования и науки Германии и целого ряда немецких фирм-производителей лазерной техники. Я вижу большой потенциал сотрудничества между нашими университетами, который мы должны развивать».

Президент РКК «Энергия» В. А. Лопота: «Оборудование, которое мы сегодня презентуем — это плод почти 30-летнего труда ученых России и Германии. Технологические процессы, которые могут быть реализованы на его основе, могут обеспечить успех в решении одной из основных проблем машиностроения — облегчении конструкций. И то, что мы сегодня видим — это реальные технологии, способные совершить революцию в машиностроении, в создании систем, обеспечивающих жизнедеятельность человека».

От Министерства образования и науки Германии выступил Хольгер Юнге: «Мы сотрудничаем уже более 20 лет. В России сильная наука, в Германии — сильное машиностроение, и совместными усилиями мы можем достичь многого. Главная цель этого Центра — обучение студентов. Будущие технологи, конструкторы могут на этом оборудовании учиться, практиковаться. Этот центр будет также демонстрационной площадкой для средних и малых предприятий. Кроме того, Центр также сможет и зарабатывать».

Директор Центра проф. Г. А. Туричин: «Этот центр — зримое воплощение мечты большой группы людей, работавших над выполнением проекта по созданию Центра. Он укомплектован самыми современными лазерными технологическими комплексами, покрывающими по своим возможностям практически всю сферу применения лазерных технологий в машиностроении. Совместно с ИЛиСТ СПбГПУ он образует крупнейшую в Европе струк-



Директор Российско-Германского центра лазерных технологий СПбГПУ профессор Г. А. Туричин проводит экскурсию по центру

туру в области машиностроительных лазерных технологий. Центр будет не только обеспечивать обучение студентов, выполнение исследований и разработок, а также заказов промышленных предприятий, но и послужит «центром кристаллизации» для инновационных компаний, работающих в области лазерных и смежных технологий».

После церемонии открытия директор Центра Г. А. Туричин провел техническую экскурсию для почетных гостей, представителей науки и промышленности и журналистов. Оборудование Центра позволяет реализовывать следующие технологии:

ERLASER® HARD+CLAD — роботизированная лазерная порошковая наплавка и термоупрочнение;

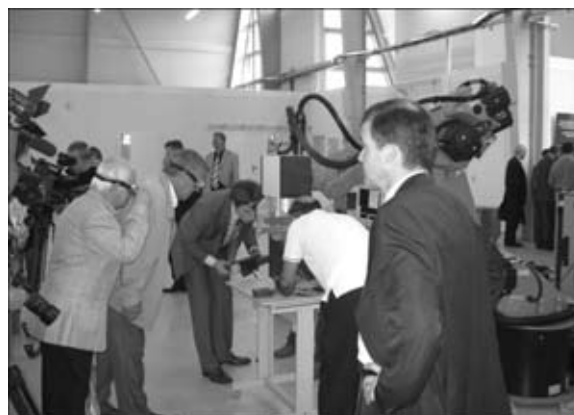
JENOPTIK VOTAN C-BIM — лазерная 3-D резка неметаллических материалов и тонких металлов;

ROFIN SWS — роботизированная дистанционная лазерная сварка металлических материалов;

ROFIN StarWeld 500 — лазерная импульсная микросварка и глубокая гравировка;

ROFIN StarShape 300C — лазерная перфорация, сверление отверстий, маркировка неметаллических материалов;

ARNOLD — лазерная сварка и резка трехмерных металлических заготовок, в том числе толстостенных и крупногабаритных;



Демонстрация роботизированной системы дистанционной лазерной сварки ROFIN SWS



Дистанционная лазерная сварка теплообменника (ROFIN Scan Welding System)

Лазерное термоупрочнение пресс-формы (Erlas Hard+Clad)

LIMO LASER WORKSTATION — лазерная сварка пластика.

Гибкость представленного оборудования и высокая степень его автоматизации позволяют быстро перенастраивать технологические комплексы и изменять используемые технологии, обрабатывая широчайший спектр материалов и изделий.

В этот же день был подписан договор о сотрудничестве между СПбГПУ и Высшей школой передовых оптических технологий Университета Эрлангена-Нюрнберга. В соответствии с договором, университеты будут заниматься научными исследованиями по направлениям взаимного интереса. Соглашение предполагает обмен студентами и аспирантами, реализацию совместных научно-исследовательских проектов; участие профессоров, инженеров и студентов в конференциях, семинарах и тренингах, которые будут проводиться в обоих университетах; организацию различных совместных мероприятий.

4 августа состоялась экскурсия в ИЛиСТ СПбГПУ, которую провел Г. А. Туричин, выделив следующие направления деятельности ИЛиСТ:

исследование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом;

технологические исследования и разработки в области лазерных и электронно-лучевых технологий;

разработка гибридных технологий лазерно-дуговой сварки и наплавки;

создание математических моделей лазерной, электронно-лучевой, лазерно-дуговой, светолазерной сварки.

ИЛиСТ оснащен двумя уникальными непрерывными иттербиевыми волоконными лазерами мощностью 5 и 15 кВт фирмы IPG (IRE-Polus Group). Расходимость выходных пучков таких лазеров существенно ниже, чем у других, имеющих тот же диапазон мощности, что позволяет использовать длиннофокусную фокусирующую оптику с существенно большими рабочим диапазоном. Зам. директора по производству И. А. Цибульский отметил, что с учетом простоты доставки лазерного излучения к объекту, основными областями применения волоконных лазеров могут быть 3D резка, дистанционная сварка, сварка труб, кузовная сварка, наплавка и другие родственные технологии обработки материалов.

Будем надеяться, что на шестой международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (23–25 сент. 2009 г., г. Санкт-Петербург) сотрудники Российско-Германского центра лазерных технологий ИЛиСТ СПбГПУ представят новые результаты в области применения лазеров в сварке, наплавке, пайке и резке.

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

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

К 70-ЛЕТИЮ Г. М. ГРИГОРЕНКО



В августе исполнилось 70 лет Георгию Михайловичу Григоренко — известному ученому в области специальной электрометаллургии и материаловедения, академику НАН Украины, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии Украины

в области науки и техники, заведующему отделом физико-химических методов исследования материалов.

Георгий Михайлович родился 24 августа 1939 г. в Киеве. Вся его трудовая и научная деятельность связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, куда он пришел молодым специалистом в 1961 г. после окончания Киевского политехнического института.

Г. М. Григоренко известен широкому кругу научной общественности Украины, а также в ближнем и дальнем зарубежье как специалист в области исследований взаимодействия газов с жидкими металлами в обычном колебательном состоянии и при дуговом и плазменном плавлении.

Г. М. Григоренко рассчитаны термодинамические константы равновесия систем металл–азот и металл–водород, установлены температурные зависимости растворения и параметры взаимодействия этих газов с жидкими металлами, определены особенности поглощения азота из плазмы электрической дугой и коэффициенты пропорциональности для квазиравновесных условий поглощения азота различными металлическими расплавами. Результа-

ты исследований представлены в виде уравнений и математических моделей, позволяющих рассчитать ожидаемое содержание азота в расплавах и слитках.

Последние годы Г. М. Григоренко активно занимается исследованиями физико-химических свойств флюсов и шлаков (вязкости, азотопроницаемости, растворимости), используемых при сварке и в специальной электрометаллургии, а также разработкой и внедрением дугошлакового переплава в азотосодержащей атмосфере для выплавки слитков высокоазотистых сталей и сплавов. Эта технология прошла широкое промышленное опробование в Украине и Франции.

Г. М. Григоренко большое внимание уделяет подготовке научных кадров. Под его руководством было подготовлено шесть докторов и девять кандидатов технических наук. Уже более двадцати лет он является заместителем заведующего базовой кафедрой «Физическая металлургия и материаловедение» Московского физико-технического института.

С 1993 г. Г. М. Григоренко является заместителем главного редактора журнала «Современная электрометаллургия», входит в редакцию журнала «Автоматическая сварка». Он автор более 500 научных работ, в числе которых пять монографий и более 100 авторских свидетельств и патентов.

Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, творческих успехов в научной и педагогической деятельности, большого человеческого счастья.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка»

ПОДПИСКА — 2009 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США
* В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контакты: телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____

200

г. по

200

г. включительно

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) - 700 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) - 550 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) - 500 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) - 600 \$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290 мм) - 400 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) - 400 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) - 400 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) - 400 \$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) - 570 \$

Полноцветная (200×290 мм) - 340 \$

Полноцветная (200×142 мм) - 170 \$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (170×245 мм) - 300 \$

Полноцветная (170×120 мм) - 170 \$

Полноцветная (82×120 мм) - 80 \$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

• Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

• Статья на правах рекламы - 50% стоимости рекламной площади

• При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000 \$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрезки 200×290 мм

• В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 7.0

• Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

• К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 08.09.2009. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 7,8. Усл. кр.-отг. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 4 цв. вклейки.

Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

© Автоматическая сварка, 2009



ГП «Опытный завод
сварочных материалов
ИЭС им. Е.О. Патона
НАН Украины»

**Производство материалов для
дуговой сварки, наплавки и резки:**

Электроды — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6V, АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21V, АНО-27, АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70, ТМА-1V, ТМА-3V, ЦУ-5, ТМУ-21V, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЭА-395/9, ЭА-400/10V, ЦЧ-4, Комсомолец-100, Т-590, АНР-2

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4НЗТ, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные — по ГОСТ 9087-81, а также АН-М13, АН-25, АН-72

Флюсы керамические — АНК-40, АНК-47А, АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина
г. Киев-112
ул. О. Телиги, 2

Тел.: (044) 456-64-95
456-63-69
Факс: (044) 456-64-95
456-63-08

HYUNDAI
WELDING CO., LTD.



Ваши надежные партнеры в мире сварки!



Официальный дилер "HYUNDAI Welding Co., Ltd." в Украине:
ООО "НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА "ЗЭНА"
ул. Антоновича (Горького), 69, г. Киев, 03150 (справки в г.Киеве и в г.Харькове)
тел. +38(044) 200-80-25, факс (044) 200-85-17
e-mail: info@zena.com.ua
www.zena.com.ua

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной

обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,

напыления и металлизации

Электроды наплавочные, специального назначения,

для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курганская, 1
г. Днепропетровск
49051, Украина

Тел.: (380562) 35-50-25
Тел./факс: (380562) 35-19-41
E-mail: sp@spetssplav.dp.ua

АББ - сердце робототехники

Робототехнические комплексы
для дуговой и контактной сварки



- Роботизация всего производственного цикла
- Роботизированные заводы "без людей"

АББ Лтд
Украина, 03038, Киев
ул. Гриценко, 2/1
Тел.: +380 44 495 22 11
Факс: +380 44 495 22 10
E-mail: robotics@ua.abb.com
www.abb.ua

ABB

С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины



предприятие
«Триада-Сварка»
г. Запорожье

- Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- Пуско-наладочные работы
- Широкий выбор сварочного оборудования



тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua
Сервисный центр: (061) 270 2939. www.triada-weld.com.ua



ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклонизделий» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.

На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН-348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов. **МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ**
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.



TBi Industries



**ГОРЕЛКИ
MIG /
MAG
и TIG
СВАРКИ**

**НЕМЕЦКОЕ
КАЧЕСТВО**



ПРЕДСТАВИТЕЛЬ В УКРАИНЕ - ЗАВОД ДОНМЕТ

Краматорск Тел. (06264) 5-77-13, 4-26-85 E-mail: svarka@donmet.com.ua <http://www.donmet.com.ua>