



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

Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай,
В. Ф. Грабин, В. Н. Замков,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
И. В. Кривцун, С. И. Кучук-Яценко,
Ю. Н. Ланкин,
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, В. Ф. Мошкин,
О. К. Назаренко, И. К. Походня,
И. А. Рябцев, Ю. А. Стеренбоген,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)
Б. Брейтвейт (Великобритания)
Д. фон Хофе (Германия)
К. Буше (Франция)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
Т. Игар (США)
К. Иноуэ (Япония)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Чжан Янмин (Китай)
В. К. Шелег (Беларусь)

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины изданий
для публикации трудов соискателей
ученых степеней.
При перепечатке материалов ссылка
на журнал обязательна.
За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности
не несет.

СОДЕРЖАНИЕ

Институту электросварки им. Е. О. Патона
НАН Украины — 70 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Патон Б. Е. Электрическая сварка мягких тканей в
хирургии 7
Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Теория и практика TIG-F
сварки (A-TIG) (Обзор) 12
Ищенко А. Я. Особенности применения алюминиевых
высокопрочных сплавов для сварных конструкций 16
Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Иванченко В. Г.
Разработка припоев для пайки жаропрочных сплавов на
основе никеля и титана 27
**Кучук-Яценко С. И., Великоиваненко Е. А., Розынка
Г. Ф., Швец Ю. В., Дидковский А. В.** Исследование
остаточных напряжений в сварных соединениях рельсов,
полученных при контактной стыковой сварке оплавлением 33
**Лобанов Л. М., Коротынский А. Е., Юматова В. И.,
Скопюк М. И.** Выбор методов комплексной оценки
качества сварочного оборудования 37

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Ющенко К. А. Свариваемость и перспективные процессы
сварки материалов 40
Добрушин Л. Д. Современное состояние и перспективы
развития сварки взрывом и высокоскоростным ударом
(Обзор) 46
Микитин Я. И., Окул В. И., Дух С. В., Илюшенко В. М.
Оборудование ОАО «КЗЭСО» для дуговой и
электрошлаковой сварки 53
Найда В. Л., Мозжухин А. А., Лобанов О. Ф. Новое
поколение оборудования для автоматизированного
ультразвукового контроля сварных труб 58
**Красильников С. Г., Гулида В. П., Ющенко К. А., Лычко
И. И.** Сотрудничество НКМЗ и ИЭС им. Е. О. Патона в
области электрошлаковой сварки в тяжелом машино-
строении 63

ХРОНИКА

57-я Ежегодная ассамблея Международного института
сварки 67
Наши поздравления 69

ИНФОРМАЦИЯ 70

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Каховский завод электросварочного оборудования

Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона

СП «ТМ ВЕЛДТЕК»

Ново-Краматорский машиностроительный завод

Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 9 (617)

September 2004

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

Yu. S. Borisov, N. M. Voropai,
V. F. Grabin, V. N. Zamkov,
A. T. Zelnichenko, A. Ya. Ishchenko,
I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko, Yu. N. Lankin,
V. K. Lebedev (vice-chief ed.),
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
V. I. Makhnenko, V. F. Moshkin,
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,
I. A. Ryabtsev, Yu. A. Sterenbogen,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
B. Braithwaite (UK)
C. Boucher (France)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Diltey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
T. Eagar (USA)
K. Inoue (Japan)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
Zhang Yanmin (China)
V. K. Sheleg (Belarus)

Address:

The E. O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
T. V. Yushina
Electron gallery:
I. S. Batasheva, 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

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of
Ukraine is 70 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Paton B. E. Electric welding of soft tissues in surgery 7
Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Theory and practice of TIG-F
(A-TIG) welding (Review) 12
Ishchenko A. Ya. Aluminium high-strength alloys for welded
structures 16
Khorunov V. F., Maksymova S. V., Ivanchenko V. G. Devel-
opment of brazing alloys for brazing heat-resistant alloys on
nickel and titanium base 27
**Kuchuk-Yatsenko S. I., Velikoivanenko E. A., Rozyinka
G. F., Shvets Yu. V., Didkovsky A. V.** Study of residual
stresses in rail welded joints made by flash butt welding 33
**Lobanov L. M., Korotynsky A. E., Yumatova V. I.,
Skopyuk M. I.** Selection of methods for integrated assess-
ment of welding equipment quality 37

INDUSTRIAL

Yushchenko K. A. Weldability and challenging processes for
materials welding 40
Dobrushin L. D. State-of-the-art and prospects for develop-
ment of welding by explosion and high-velocity impact
(Review) 46
Mikitin Ya. I., Okul V. I., Dukh S. V., Ilyushenko V. M.
Equipment of OJSC «KZESO» for arc and electroslag welding 53
Naida V. L., Moszhukhin A. A., Lobanov O. F. New
generation of equipment for automated ultrasonic testing
of welded pipes 58
**Krasilnikov S. G., Gulida V. P., Yushchenko K. A., Lychko
I. I.** Cooperation of NKMZ and E. O. Paton Electric Welding
Institute in the field of electroslag welding and heavy
engineering 63

NEWS

57th Annual Congress of IIW 67
Our congratulations 69

INFORMATION 70

*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.*

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ — 70

Институт электросварки создан академиком Евгением Оскаровичем Патоном в составе Всеукраинской Академии наук в 1934 г. на базе электросварочной лаборатории при Кафедре инженерных сооружений ВУАН и электросварочного комитета. Становление и вся последующая деятельность Института электросварки (ИЭС) связаны с именем этого выдающегося инженера и ученого. Он определил основные научные направления института в области технологии сварки и сварных конструкций, которые актуальны и сегодня.

Е. О. Патон сумел предвосхитить огромные перспективы развития технологии электрической сварки металлов — детища талантливых русских изобретателей Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова. Убедительным подтверждением этого научного предвидения есть тот непреложный факт, что сегодня сварка является ведущим технологическим процессом неразъемного соединения металлических и неметаллических материалов в различных условиях и средах, включая космическое пространство и Мировой океан. В этом отражается значительный вклад коллектива института за 70 лет его деятельности.

На первом этапе специалистами института была доказана принципиальная возможность изготовления сварных конструкций, не уступающих по своей прочности и надежности клепаным, а по ряду показателей значительно их превосходящих. Это послужило основой для массового применения сварки в дальнейшем. В эти же годы в институте было научно обосновано представление о дуговой сварке как металлургическом процессе, под руководством Е. О. Патона проведены исследования по ее автоматизации. К 1940 г. была завершена разработка и начато внедрение на заводах страны высокопроизводительного процесса сварки под флюсом.

Решающее значение приобрела автоматическая сварка под флюсом в годы Великой Отечественной войны. Непосредственно в цехах танкового завода на Урале сотрудники института работали и внедрились технологию автоматической сварки броневой стали, позволившую создать поточное производство сварных корпусов танков Т-34 и механизировать сварку другой военной техники. В заводских условиях коллектив института не прекращал научных исследований.

Довоенный и военный этапы в деятельности института — период становления научной школы, убедительным подтверждением авторитета которой явилось присвоение институту в 1945 г. имени Евгения Оскаровича Патона.

В годы восстановления разрушенного войной народного хозяйства усилия коллектива института были направлены на расширение областей применения высокопроизводительной автоматической и механизированной сварки под флюсом взамен ручной, на рационализацию и индустриализацию производства сварных конструкций. Сотрудники института первыми в мире осуществили автоматическую сварку листовых конструкций непосредственно при монтаже.

Расширилось участие специалистов-сварщиков в разработке совместно с металлургами хорошо свариваемых конструкционных сталей для ответственных сварных конструкций и сооружений. Работы этого периода положительно сказались на темпах послевоенного восстановления промышленности, развития современного производства строительных металлоконструкций, производства высоконадежных в сварном исполнении изделий тяжелого, транспортного, химического и энергетического машиностроения.

Решение главной задачи — повышение производительности и уровня механизации сварочных работ — требовало непрерывного расширения в институте исследований по изысканию новых способов и приемов механизированной сварки, естественно, без сокращения работ по увеличению рациональных областей применения дуговой сварки под флюсом. Поиск возможности сварки под флюсом швов, расположенных в различных пространственных положениях, завершился созданием под руководством Е. О. Патона способа принудительного формирования сварного шва, который положил начало механизации дуговой сварки швов на вертикальной плоскости.

12 августа 1953 г. отечественная и мировая наука понесла тяжелую утрату — на 84-м году оборвалась жизнь Евгения Оскаровича Патона, человека, влиставшего яркую страницу в историю отечественной науки и техники. Его ученики и последователи, весь коллектив института достойно продолжили дело, начатое его основателем. С 1953 г. и до настоящего времени директором института является его сын, академик Борис Евгеньевич Патон.

Одним из наиболее значительных достижений института начала 1950-х гг. стало создание новой технологии сварки плавлением металла больших толщин — электрошлаковой, которая в корне изменила производство тяжелых станин, котлов, гидроагрегатов и других уникальных сварно-прокатных, сварно-литых конструкций. Ее применение позволило в значительном диапазоне толщин получить сварные соединения высокого качества.

Позднее совместно с ЦНИИТМаш и другими организациями создан способ сварки в углекислом газе тонкой проволокой, получивший широкое применение в промышленности и обеспечивший значительный рост уровня механизации сварочных работ. Дальнейшим развитием газозащитной дуговой сварки плавящимся электродом стали разработка процесса и оборудования для импульсно-дуговой сварки, сварки в смесях активных и инертных газов. В этой связи следует особо подчеркнуть важность работ по созданию полуавтоматов, которые постепенно вытеснили там, где это возможно и целесообразно, малопроизводительную сварку штучными электродами.

В конце 1950-х гг. в институте активно начались исследования в области электронно-лучевой сварки. Усилия ученых были направлены на исследование физико-металлургических процессов при воздействии мощного (до 100 кВт) острофокусного пучка электронов на толстолистовые (150...200 мм)

конструкционные материалы. Особенно важной задачей, с которой институт успешно справился, являлась разработка технологии замыкания кольцевых швов, которая обеспечивала отсутствие корневых дефектов в виде раковин, пор и несплошностей.

Дальнейшим этапом развития лучевой технологии явилось ее применение для целей сварки и резки лазером. В институте проводятся систематические исследования в области импульсной и непрерывной лазерной сварки. В последнее время специалистами института разработаны гибридные источники нагрева — лазер-дуга, лазер-плазма.

На всех этапах деятельности института особое внимание уделялось исследованию физических, химических и металлургических аспектов поведения материалов при сварке. Лаборатории института были оснащены необходимой исследовательской аппаратурой для этих целей.

В институте получили развитие исследования по всем основным направлениям сварки давлением — стыковой контактной оплавлением и сопротивлением, точечной сварке, трением, диффузионной сварке.

Изучены физические и технологические особенности новых технологических процессов контактной сварки оплавлением, созданы системы автоматического управления и диагностики качества соединений. На базе новых технологий разработано и освоено производство нескольких поколений специализированных и универсальных машин для контактной стыковой сварки деталей широкого сортамента из низколегированных и высокопрочных сталей с площадью поперечного сечения до 200 тыс. мм², а также сплавов алюминия, титана, хрома, меди. Наиболее массовое применение нашли машины для сварки рельсов различных категорий в полевых и стационарных условиях, машины для сварки труб диаметром от 150 до 1420 мм при строительстве магистральных трубопроводов, установки для сварки элементов конструкций аэрокосмической техники. Оборудование для контактной сварки рельсов экспортируется во многие страны мира.

На основании использования энергии взрыва созданы новые способы сварки, резки, плакирования и обработки сварных соединений. Сварку и резку взрывом можно осуществлять в полевых условиях, где затруднено применение громоздкого сварочного оборудования.

На протяжении многих лет институт проводит исследования по сварке в космосе. В 1969 г. на борту космического корабля «Союз-6» летчик-космонавт В. Н. Кубасов впервые в мире осуществил уникальный эксперимент по сварке электронным лучом, плазмой и плавящимся электродом на установке «Вулкан», созданной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Так было положено начало космической технологии, имеющей большое значение в программе освоения космического пространства. В 1984 г. был проведен чрезвычайно важный, подготовленный институтом, эксперимент на борту орбитальной станции в открытом космосе. Космонавты С. Савицкая и В. Джанибеков впервые в открытом космосе с помощью ручного электронно-лучевого инструмента (УРИ) выполнили процессы сварки, пайки, резки и напыления. Период с 1985 по 2000 гг. характерен ростом объема работ, выполненных в космосе. Продолжались работы по нанесению покрытий и сварке металлов, проведены комплексные эксперименты по раскрытию 12-метровой ферменной конструкции, сопровождавшиеся сваркой и пай-

кой ее отдельных узлов с помощью УРИ, раскрыты две 15-метровые ферменные конструкции, являвшиеся несущей основой для многоразовых солнечных батарей технологического модуля, пристыкованного к орбитальной станции «Мир».

Параллельно в институте решалась и такая сложная проблема, как механизация дуговой сварки под водой, которая приобрела большое значение в связи с освоением прибрежного шельфа Мирового океана. Специалисты института создали оборудование для механизированной дуговой сварки и резки специальной порошковой проволокой на глубинах до 60 м и успешно развивают исследования по осуществлению сварки на больших глубинах.

Основополагающее значение приобрели результаты систематических исследований в области физики и металлургии сварки различных металлов и сплавов. Среди них установление кинетики кристаллизации металла шва, природы его структурной и химической неоднородности, механизмов поро- и трещинообразования, средств борьбы с дефектами. Результаты этих исследований во многом являются серьезной теоретической базой для создания и совершенствования различного типа сварочных и наплавочных материалов, а также технологий контроля качества.

Интенсивное развитие современной техники сопровождается постоянным расширением сортамента конструкционных металлов и сплавов для сварных конструкций. В ходе исследований по изучению процессов, протекающих в сварочной ванне, созданы новые сварочные материалы, электроды, порошковые проволоки, флюсы, газовые смеси.

В связи с возрастающими объемами применения пластмасс как конструкционного материала в институте развернуты исследования по их сварке, в первую очередь, по сварке труб из пластмасс. К этому направлению примыкают работы по склеиванию.

Экспериментально-теоретические исследования и научные разработки в области прочности сварных соединений и конструкций являются традиционными направлениями в тематике института, начало которым было положено Е. О. Патоном. Сегодня эти исследования носят многоплановый характер, для их проведения используется современное лабораторно-испытательное оборудование в сочетании с проведением уникальных натурных экспериментов и компьютерного моделирования. Это позволяет разрабатывать новые эффективные методы повышения надежности ответственных инженерных сооружений при статическом и циклическом нагружении, а также устанавливать расчетно-конструктивные принципы обеспечения заданных служебных свойств сварных соединений. Проблема создания надежных сварных конструкций охватывает также вопросы выбора материалов, рациональных конструктивных решений, технологии изготовления и монтажа, снижения металлоемкости, которые институт успешно решает в содружестве со многими отраслевыми организациями и предприятиями. В последнее время ведутся интенсивные работы по повышению надежности, долговечности и ресурса сварных конструкций, а также созданию эффективных методов их диагностики.

Сегодня системы непрерывного мониторинга, разработанные в институте, успешно работают на ряде нефтехимических производств с использо-

ванием связи по системе Интернет. Это позволяет строить контрольные и управляющие системы, которые дают возможность независимо от места расположения эксплуатировать конструкции наблюдать за ее состоянием из единого специализированного диагностического центра.

Работы института не ограничиваются исследованиями в области металлических материалов. Сотрудников института интересовали и проблемы сварки полимерных материалов и изделий из них. В последние годы появилось еще одно направление — электросварка мягких тканей живых организмов. Результаты этих исследований нашли применение в практике хирургических операций.

С начала 1950-х гг. по инициативе академика Б. Е. Патона в институте развернуты поисковые исследования и экспериментальные разработки по выявлению возможности использования сварочных источников нагрева для получения металлов и сплавов особо высокого качества и надежности, на основе которых сформировалось второе основное научное направление в деятельности института: специальная электрометаллургия. Усилия и успехи коллектива в этой новой области обеспечили заметное продвижение в развитии современной качественной металлургии.

К новым электрометаллургическим процессам в первую очередь относится электрошлаковый переплав расходуемого электрода в водоохлаждаемую изложницу. Фундаментальные исследования сущности электрошлакового процесса, его физико-химических, металлургических и электротехнических особенностей обеспечили передовые позиции института в разработке и применении электрошлаковой технологии, наплавки, литья, подпитки и др.

В последние годы в институте выполнен комплекс научно-исследовательских работ, послуживших основой для разработки нового поколения электрошлаковых технологий, основанных на получении слитков и заготовок непосредственно из жидкого металла без переплава расходуемых электродов. Эти технологии запатентованы в Украине и за рубежом и реализованы в промышленности. В частности, на Ново-Краматорском машиностроительном заводе на основе этих технологий создан уникальный комплекс по производству биметаллических прокатных валков мирового уровня.

В институте созданы еще две электрометаллургические технологии: плазменно-дуговая и электронно-лучевая. Разработка техники и технологии этих переплавных процессов велась параллельно с фундаментальными исследованиями физико-металлургических особенностей рафинирования в контролируемой атмосфере или вакууме и процессов кристаллизации сталей, сложнолегированных сплавов, цветных и тугоплавких металлов.

Плазменно-дуговой переплав, благодаря систематическим исследованиям высокотемпературных систем газ-металл, открыл широкие возможности для производства нового класса конструкционных материалов — высокоазотистых сталей. Создание мощных плазмотронов для металлургии позволило институту «войти» в большую металлургию — были разработаны новые конструкции установок типа «ковш-печь» емкостью до 100 т. Качество металла, полученного в этих установках, не уступает электрошлаковому.

Совместными усилиями ученых института, отраслевых научных учреждений и производствен-

ников создана совершенная электронно-лучевая техника, а технология электронно-лучевой плавки в вакууме стала незаменимым процессом получения особо качественных материалов в металлургии и машиностроении. Работы в этом направлении в настоящее время сконцентрированы в созданном при институте научно-инженерном центре «Титан», который выполняет заказы как для предприятий Украины, так и для зарубежных компаний.

Исследования процесса испарения в вакууме металлических и неметаллических материалов и их последующей конденсации как основы для парофазной металлургии открыли возможность для получения покрытий из различных материалов, включая жаростойкие, тугоплавкие и композиционные, позволили в широких пределах регулировать состав, структуру и свойства осажденных слоев. Толщина наносимых покрытий в зависимости от назначения регулируется от десятка микрометров до нескольких миллиметров.

В начале 1980-х гг. в институте формируется новое научное направление — комплексные исследования по созданию новых и совершенствованию существующих технологических процессов термического нанесения защитных и износостойких покрытий. В настоящее время институт развивает практически все современные процессы нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Разработаны технология и установки для плазменно-дугового напыления износостойких покрытий, а также установки для детонационного напыления, которые могут эксплуатироваться с применением различных рабочих газов (ацетилена, пропана, водорода).

На всех этапах деятельности института одной из его главных задач является разработка оборудования для механизации процессов сварки и наплавки с целью замены ручного труда сварщика. Основные принципы построения сварочных установок, заложенные еще Е. О. Патоном, плодотворно развиваются коллективом конструкторов ОКТБ института с учетом новых тенденций развития сварочного и металлургического производства.

Большое внимание в институте уделяется созданию и широкому применению автоматического управления и регулирования технологическими процессами сварки, спецэлектрометаллургии и напыления с использованием современной электронно-вычислительной техники. Основой для этих разработок послужили фундаментальные исследования конкретных технологических процессов как объектов управления. Первые исследования в этом направлении были начаты академиком Б. Е. Патоном еще во время Великой Отечественной войны и успешно развиваются под его непосредственным руководством в настоящее время.

Значителен вклад в творческие успехи коллектива института тех научных подразделений и сотрудников, которые ведут математические исследования, создают новые методики современных физических и химических исследований, разрабатывают информационные системы, банки данных и экспертные системы, занимаются прогнозированием и систематическим анализом экономических аспектов развития сварочной науки и техники.

Благодаря сочетанию целенаправленных фундаментальных теоретических исследований с инженерно-прикладными разработками, тесным творческим связям с промышленными предприятиями в реализации технологических новшеств ин-

ститут за прошедшие 70 лет своей деятельности превратился в крупнейший в стране и мире научно-исследовательский центр в области сварки и родственных технологий.

Сегодня институт представляет собой научно-технологический комплекс, куда входят опытное конструкторско-технологическое бюро, экспериментальное производство, три опытных завода, ряд инженерных центров. Во всех его подразделениях работает около 3500 человек, из них собственно в институте 1700 человек. Научный потенциал института составляют 300 научных сотрудников, среди которых 8 академиков и 6 членов-корреспондентов НАН Украины, 72 доктора наук и более 200 кандидатов наук.

Деятельность института и хозрасчетных подразделений строго координирована и полностью ориентирована на совместное решение задач по основным научным направлениям.

Активное и непосредственное участие ученых института в практической реализации своих разработок обогащает их как работников академической науки и способствует проведению фундаментальных исследований и поисковых разработок в области сварки и смежных процессов, а также спецэлектрометаллургии. За прошедшие 70 лет институт доказал жизнеспособность ориентации на целенаправленные фундаментальные исследования, результаты которых воплощены в практических разработках, нашедших широкое практическое применение. В активе ученых института уникальные результаты познания физики дугового разряда и низкотемпературной плазмы, свойств мощных острострофукусированных пучков электронов, природы плавления, испарения, кристаллизации и конденсации металлов, физико-химических и теплофизических процессов сварки и рафинирующих переплавов, прочности и надежности сварных соединений и конструкций.

Результаты этих работ подтверждены лицензиями и полученными патентами. Институтом продано более 150 лицензий в США, Германию, Японию, Россию, Швецию, Францию, Китай и др. Получено около 2600 патентов Украины, России и дальнего зарубежья, а также более 6500 авторских свидетельств.

За годы деятельности института более 60 наиболее выдающихся разработок, выполненных и внедренных в народное хозяйство сотрудниками института в содружестве с производственными коллективами, удостоены ленинских и государственных, а также различных премий Украины.

Реализация перспективных научных разработок и инновационных проектов института осуществляется также через созданный при институте «Технологический парк», в состав которого входят свыше 30 научных организаций, предприятий, инженерных центров и опытных заводов, специализирующихся в области сварки и родственных технологий. Среди них такие известные производители сварочного оборудования, как «КЗЭСО» и «СЭЛМА».

Одним из основных направлений деятельности института является подготовка научных и инженерных кадров. Подготовка кандидатов и докторов технических наук осуществляется через докторантуру и аспирантуру. При институте работает специализированный совет по приему к защите док-

торских и кандидатских диссертаций в области сварки, спецэлектрометаллургии и автоматического управления технологическими процессами.

Подготовка инженерных кадров ведется институтом совместно с НТУУ «Киевский политехнический институт». Ученые института читают студентам обзорные курсы и руководят целевой подготовкой магистров. Научно-производственную и дипломную практику студенты проходят в научных отделах и лабораториях института.

Подготовка инженеров-физиков и математиков со специализацией в области сварки и спецэлектрометаллургии осуществляется на кафедре физической металлургии и материаловедения Киевского отделения МФТИ, организованной на базе ИЭС.

Профессионально-техническая подготовка и переподготовка специалистов сварочного производства осуществляется в учебном центре института. Система обучения в центре достаточно гибкая. Структура учебных программ предусматривает очную групповую и индивидуальную подготовку слушателей курсов. Обучение проводится по национальным и европейским стандартам с выдачей соответствующего сертификата.

На базе института, имеющего уникальный научный и кадровый потенциал, хорошо оснащенные испытательные лаборатории, создан центр по сертификации продукции сварочного производства, который аккредитован как орган по сертификации под названием «СЕПРОЗ». В настоящее время центр проводит работу по совершенствованию украинской системы сертификации в соответствии с международными нормами и правилами.

Институт поддерживает международные связи с ведущими центрами по сварке в Европе, США, Азии, является членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации. На базе института действует Межгосударственный научный совет по сварке и родственным технологиям стран СНГ, Международная ассоциация «Сварка», Международное объединение «Интерм» и Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, которое входит в состав Европейской федерации EFNDT и Всемирного конгресса ICNDT.

Результаты исследований ученых института постоянно публикуются в журналах «Автоматическая сварка», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Современная электрометаллургия», «Сварщик». Кроме того, институт издает журналы на английском языке «The Paton Welding Journal» и «Advances in Electrometallurgy». В институте издаются монографии, справочники и другая книжная продукция.

Институт проводит различные конференции и семинары, организывает национальные и международные выставки.

За прошедшие 70 лет коллектив института прошел славный путь. Сегодня — это коллектив единомышленников, приумножающий успехи Патоновской научной школы, имеющей мировое признание. Институт растет и развивается, совершенствуется его структура и система управления — все направлено на дальнейшее развитие сварки и родственных процессов, а также решение базовых проблем экономики промышленного производства.



ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРКА МЯГКИХ ТКАНЕЙ В ХИРУРГИИ

Академик **Б. Е. ПАТОН** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Отмечены основные недостатки существующих способов соединения мягких тканей при хирургических операциях. Установлено, что при определенных условиях возможно соединение разрезов различных органов и мягких тканей способом, основанным на нагреве места соединения током высокой частоты. Этот способ имеет много общего с контактной сваркой сопротивлением, поэтому именуется сваркой. Многочисленные эксперименты, выполненные на животных, а позже и в клиниках, подтвердили возможность и перспективность сварки в хирургии. В клиниках Киева прооперировано свыше 2 тыс. пациентов. Перечислены проверенные и освоенные в киевских клиниках хирургические вмешательства с эффективным использованием сварки.

Ключевые слова: электрическая сварка, мягкие ткани, хирургия, соединение, аппаратура и инструмент, преимущества

Важнейшими задачами современной хирургии являются разработка и внедрение в клиническую практику новых способов соединения органов и тканей, простых в исполнении для хирурга и щадящих для больного. Существующие традиционные способы восстановления целостности ткани с использованием шовных материалов, сшивающих аппаратов, клеевых композиций и других средств не совершенны.

Так, при использовании шовных материалов существует опасность нарушения кровообращения в зоне наложения швов, миграции микроорганизмов по шовным нитям, что может привести к развитию гнойных осложнений, перитонита, гранулем, анастомозитов и периаанастомозитов. Существует также реальная угроза развития аллергических реакций организма на инородное тело. Именно поэтому все большее количество исследований в хирургии посвящено поиску новых способов соединения тканей.

Распространенный способ соединения тканей с помощью степлеров предусматривает использование аналогов шовных нитей — металлических скобок, которые остаются в тканях и имеют те же недостатки, что и нити. Кроме того, в зоне компрессии наблюдается выраженная ишемия соединяемых тканей, что осложняет процесс регенерации.

Склеивание тканей по ряду известных медикам причин также не получило широкого применения.

Лазерная сварка не обеспечивает требуемой прочности соединений. Лазерный нагрев с «припоем» на основе белка имеет некоторую перспективу использования в хирургической практике, однако усложненная технология может стать тормозом для широкого применения.

Электрическая сварка для соединения разрезов живой ткани и органов при хирургических вмешательствах впервые была осуществлена коллективом исследователей Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) совместно с учеными и специалистами экспериментального отдела Института хирургии и трансплантологии (ИХиТ) АМНУ при участии Международной ас-

социации «Сварка» и активном финансовом содействии американской компании CSMG. Вначале на животных была выполнена серия экспериментов, в которых приняли участие микрохирурги объединения «Охматдет». Работу поддерживали американские хирурги во главе с известным американским проф. Дж. Куцом из Луисвилля (США). Результаты начальных экспериментов украинского коллектива дважды демонстрировались в США американским специалистам. Поскольку на следующем этапе внимание было сосредоточено на общей хирургии и инженерных проблемах, то в состав коллектива были введены сотрудники Центрального клинического госпиталя военно-медицинского управления СБУ (клиническая база Национального медицинского университета). Исследования по микрохирургии были отложены до создания совершенной техники и получения с ее помощью положительных результатов по общей хирургии.

Опыт применения электрохирургии для резки тканей и гемостаза насчитывает около ста лет. Коллектив исследователей заинтересовался одним из электрохирургических приемов, так называемой биполярной коагуляцией. При его осуществлении электрический ток высокой частоты проходит через стенки «сжатого» сосуда или мелкие сосуды и вызывает их нагрев. При температуре свыше 50...55 °C содержащиеся в ткани белки — глобулины — начинают «разматываться» и переплетаться, в результате чего происходит соединение сжатых стенок сосуда, что исключает кровотечение. Скорость коагуляции существенно зависит от температуры: чем она выше, тем быстрее белки коагулируют.

Биполярную коагуляцию часто используют для герметизации сосудов диаметром до 1,5 мм. Герметизированный биполярной коагуляцией сосуд выдерживает без потери герметичности давление, значительно превосходящее артериальное.

Наши первые исследования показали, что при определенных условиях благодаря биполярной коагуляции можно соединять не только стенки тонкого сосуда, но и множество других слоев различных органов и тканей. Однако предстояло выяснить, что требуется для того, чтобы биполярную коагуляцию можно было использовать для сое-



Рис. 1. Источник питания со встроенной аппаратурой управления

динения тканей в месте разреза взамен традиционного соединения с помощью ниток или металлических скобок. При этом необходимо было обеспечивать надежность соединения органов или тканей, гарантирующего их функционирование в раннем послеоперационном периоде и скорейшее восстановление функций оперированного органа.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что надежность соединения органов и тканей зависит от многих факторов, в частности, формы кривой тока высокой частоты, формы кривой термического цикла, абсолютных значений частоты, температуры нагрева свариваемых участков ткани и сжимающих их электродов, удельного давления электродов, продолжительности нагрева ткани, ее физических свойств и др. Надежное соединение тканей возможно только при благоприятном сочетании перечисленных факторов.

Процесс соединения органов и тканей напоминает контактную сварку сопротивлением и имеет

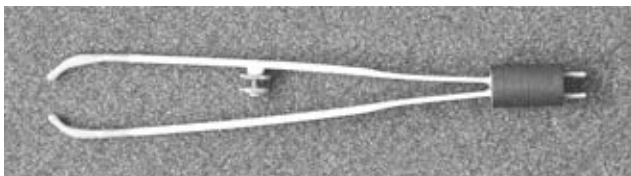


Рис. 2. Биполярные пинцеты для сварки

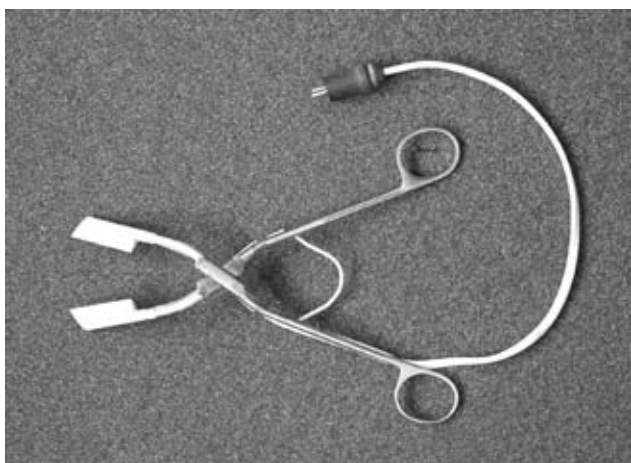


Рис. 3. Зажим для сварки

с ней много общего. Поэтому далее этот процесс будем называть сваркой.

Для того чтобы восстановление физиологических функций оперированного органа или ткани протекало достаточно быстро и не влекло за собой осложнений, термическое воздействие должно быть, с одной стороны, минимальным, с другой — достаточным для получения надежного соединения. Этим соответственно, кроме всего прочего, и отличается процесс сварки от традиционного процесса биполярной коагуляции, при котором перегрев ткани в месте расположения электродов или неудачное его осуществление может привести к потере жизнеспособности ткани. Важно также, чтобы сварочное оборудование и сварочный инструментарий были простыми и удобными для хирурга, не отвлекали его внимание и не приводили к потере времени. Поэтому особое внимание должно быть обращено на создание системы автоматического управления сварочным комплексом.

Нашему коллективу удалось в значительной мере разрешить проблемы, связанные с осуществлением сварки мягких тканей, создать лабораторную аппаратуру с автоматической системой управления сварочным процессом, необходимую для проверки технических решений, и довести ее до применения в общей хирургии и гинекологии.

Аппаратура и хирургический инструмент. Установлено, что широко распространенная аппаратура для коагуляции не пригодна для сварки. Ученым и специалистам ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в сотрудничестве с врачами удалось определить специфические требования, которым должна удовлетворять аппаратура для сварки. К ним относятся, в частности, изложенные выше требования. Кроме того, необходимо было изыскать способы самонастраивания системы высокочастотного питания, обеспечивающие образование сварных соединений при наименьшем тепловом воздействии на ткань в условиях возможных изменений толщины свариваемых слоев и их физических свойств. Настройка системы управления должна была проводиться автоматически без отвлечения хирурга от выполнения его основных функций. В результате проведения комплексных исследований разработаны способ соединения мягких тканей, устройство и инструменты для его осуществления. Идеи, заложенные в разработки, признаны оригинальными и на них выданы патенты [1–7]. Несомненным достоинством аппаратуры следует считать ее универсальность. Она может быть успешно использована в качестве коагулятора для резки, а также для получения за один прием кольцевых и линейных швов. Одна из моделей источника питания со встроенной аппаратурой управления показана на рис. 1.

Хирургические инструменты выполнены в биполярном варианте (рис. 2–5). Наиболее часто используются пинцеты и зажимы. В тех случаях, когда хирургу трудно контролировать давление, ориентируясь только на силу пальцев, удерживающих инструмент, пинцеты оснащаются специальными приспособлениями. Следует подчеркнуть, что стабилизация давления имеет существенное зна-



чение. Поскольку у ткани малая упругость, то чем больше сила, с которой электроды сжимают ткань, тем меньше нагреваемый объем, что так или иначе отражается на конечных результатах. При избыточном сжатии неминуем электрический пробой свариваемых слоев, и наоборот, при недостаточном сжатии нагреваемый объем чрезмерно велик.

Большое значение уделялось форме рабочей поверхности электродов и материалу для их исполнения. Последний должен удовлетворять условиям длительного использования (с короткими промежутками времени) без перегрева. Одним из важных показателей операции является скорость ее выполнения, которая определяет время пребывания больного под наркозом. Электрическая сварка и в этом отношении перспективна, так как созданный специализированный инструмент предельно сокращает время выполнения соединения. В частности, таким инструментом (рис. 4) сварка выполняется за один прием в течение 2...3 с. Эффективно применение сварки и при лапароскопических операциях с использованием специализированного инструмента (рис. 5).

Эксперименты на животных. Разработка инструментов, источника питания, системы управления и программного обеспечения проводилась в тесном сотрудничестве инженеров и врачей-экспериментаторов. Каждое техническое решение проходило проверку на животных, многократно уточнялось и вновь проверялось. Одновременно выполнялись и медицинские исследования.

Вначале операции были проведены на белых крысах. После доказательства принципиальной возможности сваривания живых тканей выполнена большая серия экспериментов на кроликах. Проведены следующие оперативные вмешательства: закрытие холецистальной раны, аппендэктомия, закрытие гастротомной раны, формирование анастомозов толстого кишечника конец в конец и бок в бок, электрорезекция печени и сварка раны мочевого пузыря. После эвтаназии животных в сроке до четырех лет производилась оценка сформированных соединений в сравнительном аспекте с точки зрения степени выраженности некробиотических изменений в зоне соединения, состояние степени выраженности некротических изменений в зоне соединения, состояние эпителизации слизистой, наличия рубцовых стенозов и других сращений. Особое внимание уделялось изучению состояния межкишечных анастомозов, выполненных с применением сварочной технологии, и их сравнению с шовными соустьями при традиционной методике.

Завершающим этапом экспериментальных исследований стали операции с использованием сварочной технологии на контрольной партии свиней массой 20...25 кг (45 особей). Выбор вида животных обусловлен тем, что структура биологических тканей свиньи и человека весьма сходная. Одна из основных целей этого этапа — статистическая оценка электрической сварки как элемента хирургической технологии. Одной из первых операций на свиньях было сваривание стенки желчного пузыря. По сравнению с холецистотомией



Рис. 4. Инструмент для стыковой сварки (конец в конец) кишок

со скобочным швом, наложенным с помощью степлера «Autosuture», результаты сварки с точки зрения эпителизации, интенсивности послеоперационных сращений и толщины рубца были предпочтительнее. Затем последовали операции формирования брауновского соустья при наложении холецистоэнтероанастомозов. Хорошие результаты позволили перейти к операциям с формированием толсто-толстокишечных анастомозов с помощью сварочного пинцета, а затем и к наложению конце-концевых анастомозов толстой кишки с помощью специальных устройств, обеспечивающих соединение кишок за один прием. В операциях на толстой кишке получены достаточно обнадеживающие результаты. Через шесть месяцев линию шва удавалось идентифицировать лишь морфологически. Все анастомозы были состоятельны, проходимы, хорошо функционировали.

Одновременно проводились опыты по коагуляции ткани печени в зоне действия электродов при соответствующих режимах сварки. При этом создавалась коагуляционная борозда длиной до 60 мм, что позволяло производить бескровную краевую резекцию печени.

Животные из контрольной партии выводились из эксперимента через 14, 30, 60, 90 и 180 суток. Все прооперированные животные выжили. Осложнений, связанных с оперативным вмешательством, не наблюдалось. Проведенные исследования подготовили надежную почву для широкого внедрения метода электросварки как основного и вспомогательного способа соединения биологических тканей при операциях в клинической практике.

Опыт применения сварки в клиниках. Проведенные в ИХиТ АМН Украины экспериментальные исследования сварки тканей животных позволили перейти к поэтапному клиническому применению разработанного способа на человеке в Центральном клиническом госпитале ВМУ СБУ и в ИХиТ. Вначале сварку применяли на удалении

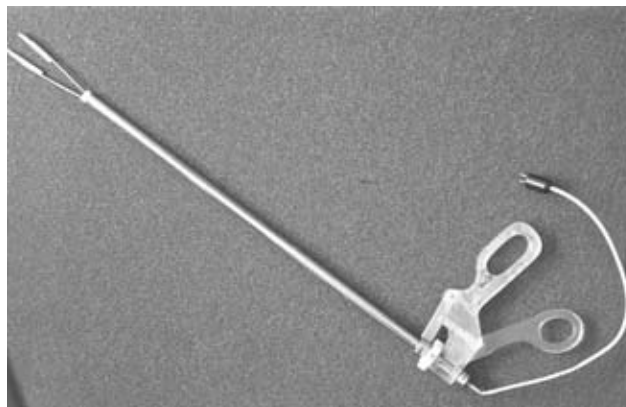


Рис. 5. Инструмент для лапароскопических операций



органов и на тканях человека, отработывали методику получения соединения и ее режимы. Затем сварочную технологию использовали при выполнении открытых оперативных вмешательств на органах или той их части (желудок, кишка), которые подлежали удалению.

Операция с применением электросварочных инструментов на человеке (соединение раны желудка после гастротомии) впервые в клинической практике выполнена в Центральном клиническом госпитале ВМУ СБУ в июне 2000 г. В последующем там же выполнены операции на желчном пузыре (рис. 6), пузырном протоке, маточных трубах и других органах. Созданы инструменты для сварки желчного пузыря, желчных протоков, толстой и тонкой кишки, маточных труб, матки, брюшины, апоневроза кожи, подкожной клетчатки. Успешное выполнение 44 операций позволило Министерству охраны здоровья Украины выдать свидетельство о регистрации оборудования для сварки органов и тканей и разрешение на его клиническое применение.

Сегодня это оборудование применяется в ряде клиник Киева (городской больнице № 1, на кафедре грудной хирургии и пульмонологии Академии последипломного образования с отделением «Политравма» больницы № 17), а также в Донецком онкологическом центре. В настоящее время с помощью электросварки операции проводятся во многих областях хирургии. Прооперировано более 2 тыс. пациентов без летального исхода либо серьезных осложнений. Тем не менее, предстоит еще много сделать для расширения областей применения электрической сварки, совершенствования хирургических приемов. Для этого потребуются прежде всего расширение наших знаний о тканях как специфичной электропроводящей среды и явлениях, протекающих в ней при нагреве, совершенствование аппаратуры, разработка специализированных инструментов для быстрого выполнения соединений. Все это должно быть в перспективе, а пока следует шире использовать созданное оборудование, которое, как показывает опыт применения в клиниках, дает хорошие результаты.

В мае этого года украинская делегация ученых и специалистов демонстрировала в США американским хирургам и представителям медицинской промышленности возможности сварочной техники

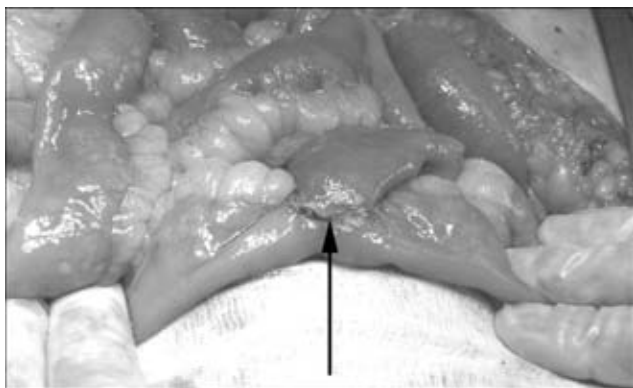


Рис. 6. Сварной шов (указан стрелкой) на разрезе желчного пузыря сразу же после выполнения

в хирургии. Присутствующие дали положительную оценку выполненной украинским коллективом работы. В частности, проф. Дж. Куц, присутствовавший на демонстрационных операциях, отметил, что выполнение подобных операций (на кишечнике, печени и других органах) может произвести революцию в хирургии в ближайшие годы (2–5 лет).

Преимущества сварки по сравнению с традиционными способами соединения тканей. Опыт применения сварки в клинических условиях подтвердил ее эффективность. Важным результатом является предотвращение развития таких серьезных последствий применения шовных материалов, скобков, клея, как:

неизбежное развитие воспалительной реакции в ответ на наличие их в ране;

угроза распространения инфекции из полых органов (кишечник, желудок) по ходу шовного материала с последующим развитием тяжелых послеоперационных осложнений;

угроза стенозирования анастомозов вследствие развития грубых рубцовых тканей в отдаленном послеоперационном периоде и др. При выполнении операций на желчном и мочевом пузыре «инородные тела» могут стать основой последующего конкрементобразования.

Перспективна электросварка при формировании анастомозов между трубчатыми или полыми органами благодаря меньшей угрозе развития анастомозитов, стенозов, инфицирования послеоперационных ран, образования гранулем, сером, лигатурных свищей, требующих нередко весьма длительного лечения.

Применение электросварки при операциях на печени и селезенке позволяет достичь максимального гемо- и холестатического эффекта, а концентрация энергии на строго локальных участках — избежать повреждений магистральных трубчатых структур (артериальных и венозных сосудов, желчных протоков).

Использование сварочных технологий позволяет ускорить выполнение оперативного вмешательства в среднем на 20...40 мин и сократить примерно на 200...250 мл потерю крови, а иногда в несколько раз больше, достичь экономического эффекта за счет сокращения показаний к применению дорогих аппаратов и степлеров, экономии шовного материала, клипс и др.

Особо весомы преимущества электросварки при их сочетании с эндоскопическими и лапароскопическими методами оперативного вмешательства, что взаимно усиливает преимущества каждого из указанных методов отдельно (надежность, малая травматичность, миниинвазивность).

Весьма перспективной электросварка должна быть при выполнении восстановительных операций на органах желудочно-кишечного тракта прежде всего кишечника, желудка, с формированием анастомозов, в том числе конец в конец, бок в бок для временной или окончательной герметизации отрезков указанных органов после удаления патологического очага.



В клинической практике в ургентной хирургии сварочные технологии также могут широко применяться при остром аппендиците, травмах паренхиматозных органов (гемостаз, резекция разрозненной части органа), перфоративных язвах желудка и двенадцатиперстной кишки, травматических повреждениях легких и др. Сваривание поврежденных стенок желчного пузыря, дистальной части общего желчного протока, технически сложное выполнение другими методами билио- и панкреатодигестивных анастомозов, удаление кист, гемангиом печени — вот тот далеко неполный перечень показаний к применению электросварки органов и тканей в хирургии гепатобиллиарной системы.

Нежный рубец в зоне анастомозируемых органов увеличивает перспективу применения указанного метода в тех областях хирургии, где лигатурный и аппаратный шов технически трудно выполнимы. Это наложение билио- и панкреатодигестивных анастомозов, операции по восстановлению проходимости маточных труб. Стенозы сосудов особенно сложны, так как ведут к изменению анатомического строения и функций анастомозируемых органов. Эту проблему также следует попытаться решить с помощью электросварки.

Сварочные технологии должны найти широкое применение в гинекологической практике. Прежде всего при восстановлении проходимости маточных труб в случае бесплодия различной этиологии, внематочной беременности (нежный рубец, меньшая степень угрозы ее стенозирования в результате рубцевания), а также при выполнении таких травматичных и опасных своими осложнениями операций, как экстирпация и надвлагалищная ампутация матки, которые выполняются практически бескровно.

Существенный эффект, как показывают первые результаты, может быть получен в проктологии.

Полученные экспериментальные результаты дают основание предполагать о вполне реальном применении электросварки в сосудистой хирургии, нейрохирургии, где важно образование нежного рубца в зоне операции, профилактике стенозов сосудов и др. Думаю, что в недалеком будущем

сварочные технологии будут успешно использоваться в трансплантологии при формировании сосудистых соустьев, в легочной хирургии.

В урологической практике электросварка тканей может найти применение для закрытия ран мочевого пузыря, уретры, соединения конец в конец поврежденных мочеточников.

Перспективно применение сварочных технологий и в ларингологии. В настоящее время уже созданы первые образцы сварочных инструментов для этих целей, которые переданы в Центральный клинический госпиталь ВМУ СБУ и нашли там клиническое применение.

Несомненно, области рационального применения сварки со временем будут расширяться. Об этом со всей очевидностью свидетельствуют результаты ее использования в клиниках. Сейчас говорят об актуальности решения задачи обеспечения оперативного вмешательства в отдаленных районах, где нет медицинской помощи, например, в космосе или опытной станции. Можно предложить в дальнейшем применение роботов, управляемых на больших расстояниях квалифицированным хирургом с помощью телевизионных систем. В отмеченных условиях сварка упростит операцию и позволит провести ее с лучшим результатом, меньшей потерей крови.

1. Пат. 39907 Україна, МКІ 7А61В17/00. Спосіб з'єднання судин та інших порожнистих органів тварин, або людини та пристрій для його здійснення / Б. Є. Патон та ін. — Оpubл. 16.07.01, Бюл. № 6.
2. Пат. 44805 С2 Україна, МКІ 7А61В17/00. Спосіб з'єднання м'яких біологічних тканин і пристрій на його здійснення / Б. Є. Патон та ін. — Оpubл. 16.09.02, Бюл. № 9.
3. Пат. 26112 С2 Україна, МКІ 6А61В17/00. Інструмент для з'єднання м'яких біологічних тканин / Б. Є. Патон та ін. — Оpubл. 16.10.02, Бюл. № 5.
4. Пат. 200206556 Україна. Спосіб зварювання м'яких тканин людини / Б. Є. Патон та ін. — Оpubл. 15.01.04, Бюл. № 1.
5. Pat. 11 2003/0158551 A1 USA. System and method control of tissue welding / B. Paton et al. — Publ. 21.08.2003.
6. Pat. 6,562,037 B2 USA. Bonding of soft biological tissues by passing high-frequency electric current therethrough / B. Paton et al. — Publ. 13.05.2003.
7. Pat. 199926669 B2 Australia, A61B17/36 A1. Bonding of biological tissue by passing high-frequency electric current / B. Paton et al. — Publ. 02.09.1999.

Main drawbacks of the available methods for joining soft tissues in surgery operations are noted. It has been established that under certain conditions it is possible to join incisions in different organs and soft tissues by the method based on heating the joining zone by a high-frequency current. This method has much in common with the resistance welding method. That is why it is called welding. As proved by multiple experiments made on animals, and later in clinics, the application of welding in surgery is feasible and highly promising. More than 2000 patients were operated in the clinics of Kiev. Surgical operations, approved and mastered by the Kiev clinics, characterised by the efficient application of welding, are listed.

Поступила в редакцию 30.06.2004



ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА TIG-F СВАРКИ (A-TIG) (Обзор)

В. Н. ЗАМКОВ, д-р техн. наук, **В. П. ПРИЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены результаты исследований влияния флюсов на процесс дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне. Особое внимание уделено анализу причин, вызывающих повышение технологических характеристик дуги, в частности увеличению глубины проплавления. Предполагается, что последнее обусловлено ростом силы Лоренца за счет контракции дуги флюсом и повышения плотности тока в анодной области. Влияние на проплавление изменения градиента поверхностного натяжения жидкого металла в сварочной ванне имеет второстепенное значение.

Ключевые слова: дуговая сварка, вольфрамовый электрод, аргон, плазма дуги, плотность тока, глубина проплавления, флюс, диссоциация

В последние годы внимание исследователей и производителей привлекает дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса, т. е. A-TIG. Глубокое проплавление металла, узкие швы, небольшая протяженность зоны термического влияния, относительно низкая погонная энергия и, как следствие, уменьшение остаточных сварочных деформаций — вот неполный перечень преимуществ A-TIG сварки.

В то же время относительно основной причины, определяющей эти преимущества — глубокого проплавления, мнения исследователей диаметрально противоположны. Ряд авторов считает, что флюс уменьшает поверхностное натяжение жидкого металла, кардинально изменяет направление конвективных потоков и теплопереноса в сварочной ванне, что в свою очередь способствует увеличению глубины проплавления. Другие авторы видят причину этого явления в сжатии дуги и увеличении ее давления на расплавленный металл.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы на основе анализа результатов опубликованных работ и многолетних исследований самих авторов дать наиболее достоверную трактовку процессов и явлений, вызывающих увеличение глубины проплавления при A-TIG сварке.

Процесс дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса разработан в ИЭС им. Е. О. Патона в середине 1960-х гг. вначале для титана, а затем для сталей и сплавов на основе меди [1–5] и получил широкое промышленное применение. Презентация этого процесса в Британском институте сварки (1993 г.) привлекла к нему внимание специалистов ряда стран и послужила толчком для его дальнейшего всестороннего изучения. Это связано с тем, что применение флюсов при сварке вольфрамовым электродом в среде инертных газов оказывает существенное влияние на процесс сварки и прежде всего на формирование швов. Наличие слоя флюса на свариваемых кромках значительно расширяет технологические возможности и повышает эффективность TIG сварки [6–8].

Такое влияние флюсов зафиксировано при TIG сварке сплавов с самыми различными теплофизическими и физико-химическими свойствами, например, разного класса сталей [7–9], сплавов титана [10], меди [11], никеля [12], магния [13] и др. и, следовательно, имеет универсальный характер. Поэтому сварку по слою флюса можно рассматривать как самостоятельный процесс или, по крайней мере, как разновидность дуговой сварки вольфрамовым электродом в инертной среде подобно плазменно-дуговой сварке. Здесь следует отметить некорректность, по нашему мнению, названия A-TIG для этого способа сварки, поскольку флюсы, применяемые для TIG сварки, не влияют на энергию активации каких-либо процессов, никакие процессы не активизируют и поэтому не являются «активаторами» чего-либо. Более подходящим названием для этого способа сварки могла бы служить аббревиатура TIG-F.

В первых же публикациях, посвященных изучению влияния флюсов на процесс аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом, отмечен ряд явлений в дуге, которые затем были подтверждены дальнейшими исследованиями. Установлено, что независимо от свойств основного металла наличие флюса в зоне сварки приводит к сжатию (контракции) столба дуги и повышению напряжения дуги [2, 13–16]. Флюс увеличивает плотность тока на аноде [8, 17, 18], повышает абсолютное значение и градиент температуры в плазме дуги [13, 19, 20]. Следует отметить, что глубина провара и степень указанных изменений в сварочной дуге взаимосвязаны и зависят при прочих равных условиях от химического состава флюса и его количества на свариваемых кромок [8, 9, 13, 14, 21, 22].

Известны и основные причины контракции дуги. Это прежде всего уменьшение размеров области, где возможно существование анодного пятна. Давление дуги и поток защитного газа оттесняют расплавленный флюс на периферию сварочной ванны и прилегающий к ней участок основного металла. В результате благодаря резкому различию электропроводности жидкого металла и расплавленного флюса, вокруг сварочной ванны образуется электроизоляционный слой [14, 20], и сварочный ток проходит лишь через центральную часть сварочной ванны, ограниченную этим слоем. Ее размеры определяются адгезией флюса к свариваемому ме-



таллу, т. е. энергией Гиббса реакций взаимодействия между ними [2, 23].

Не менее важную роль в контракции сварочной дуги играют пары флюса и продуктов его взаимодействия со свариваемым металлом [2, 6, 8, 10, 13–15, 23–26]. Однако мнения исследователей по поводу механизма контракции здесь не однозначны. Это главным образом вызвано различными представлениями о наличии и характере распределения паров в дуговом промежутке. Так, авторы работ [13, 15, 24] предполагали наличие паров флюса, основного металла и даже вольфрамового электрода [13] в столбе дуги, катодной и анодной областях. Это не позволило им [24] объяснить неизменность эффективного потенциала ионизации и повышение температуры в столбе дуги при введении в зону сварки флюсов, содержащих элементы с низким потенциалом ионизации. Более того, предложенная ими модель контракции дуги отрицательными ионами галогенов [24] не подтверждается экспериментально, поскольку она предполагает, что, например, хлоридный флюс является универсальным для сварки металлов с различными физико-химическими и теплофизическими свойствами.

В работе [15] контракция дуги флюсом при сварке сталей рассматривается исключительно с позиций содержания в нем электроотрицательных элементов, в частности кислорода. Основное внимание при этом уделяется химическим реакциям на поверхности сварочной ванны и взаимодействию плазменных потоков в дуге. Однако следует иметь в виду, что чисто фторидный флюс [27], при использовании которого подобные химические реакции невозможны, обеспечивает при сварке сталей не менее значительную контракцию дуги и глубину проплавления, чем флюсы, содержащие оксиды.

И только в работе [13] было высказано предположение, что пары флюса при сварке, вероятнее всего, находятся в периферийной области дуги.

Экспериментально установлено [28–30], что плазма аргоновой дуги при TIG и TIG-F сварке является беспримесной. Пары флюса и плавящегося анода не проникают в столб дуги, а их свечение представляет собой полый конус на периферии аргоновой плазмы.

На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований [2, 8, 14–19, 24–31] в работе [23] предложена теоретическая модель контракции дуги флюсом при TIG-F сварке. Модель описывает сжатие положительного столба дуги и ее анодного пятна как результат воздействия комплекса факторов. Это экранирование металла вокруг сварочной ванны жидким флюсом и стабилизация в ее пределах анодного пятна, повышение теплопроводности дугового газа, обусловленное процессами диссоциации и молекулярной диссоциации паров флюса, деионизация периферийных участков дуги в результате захвата электронов проводимости электроотрицательными частицами паров флюса и продуктов его взаимодействия со свариваемым металлом. Модель позволяет аналитически определить размеры электропроводящей области столба дуги. Естественно, что в зависимости от типа свариваемого металла и сос-

тава флюса степень воздействия каждого из указанных факторов на контракцию дуги может быть различной.

Причины изменения формы проплавления в случае применения флюсов менее изучены [8, 32]. Нет однозначного мнения относительно механизма влияния флюса на глубину провара. Некоторые исследователи считают, что сжатие дуги и повышение плотности энергии в анодном пятне способствуют увеличению проплавления, однако не приводят данных, поясняющих сам механизм этого увеличения. Другие же полагают, что основная причина глубокого проплавления заключается в изменении градиента поверхностного натяжения жидкого металла в сварочной ванне и, как следствие, изменении направления течения Марангони. Но влияние потока жидкого металла в сварочной ванне, вызванного градиентом поверхностного натяжения, на глубину проплавления экспериментально изучали только для поверхностно-активных элементов, содержащихся в основном металле. Таким образом, полученные результаты не относятся к флюсам для TIG-F сварки [8].

В работе [20] расчетным методом прогнозировали глубину провара при сварке TIG-F. При этом учитывали возможные причины влияния флюса на форму проплавления [6, 15, 33, 34]. Так, ссылаясь на работы [15, 34], предполагали, что уменьшение поверхностного натяжения расплавленного металла флюсом может привести (под действием давления дуги) к образованию большего углубления на поверхности сварочной ванны и соответственно к увеличению глубины шва.

Однако расчеты показали, что глубина проплавления, которая может быть получена за счет более низкого поверхностного натяжения жидкого металла (при прочих равных условиях), существенно меньше, чем глубина реальных швов, выполненных с применением флюса.

Таким образом, установлено, что изменение формы проплавления при TIG-F сварке не связано с возможным влиянием флюса на уровень поверхностного натяжения расплавленного металла в сварочной ванне. В то же время глубина проплавления значительно увеличивалась, если принимали, что флюс изменяет температурную зависимость поверхностного натяжения жидкого металла с падающей на возрастающую.

Как следует из статьи [33], в процессе сварки на поверхности сварочной ванны возникает градиент температуры, а следовательно, и градиент поверхностного натяжения, вызывающий конвективное течение Марангони. Жидкий металл течет по поверхности сварочной ванны от области с более низким к области с более высоким поверхностным натяжением. Если с увеличением температуры поверхностное натяжение уменьшается, что типично для чистых металлов, то течение направлено от центра сварочной ванны к ее периферии.

В этом же направлении происходит перенос тепла, что приводит к расширению шва и уменьшению его глубины. Если же с повышением температуры поверхностное натяжение возрастает (при наличии поверхностно-активных элементов),



то течение металла направлено от периферии сварочной ванны к ее центру. В том же направлении происходит эффективный перенос тепла, швы становятся более глубокими и узкими.

Градиент поверхностного натяжения возникает и в результате сегрегации примесей на поверхности сварочной ванны. Например, вследствие более интенсивного испарения поверхностно-активных элементов в самой горячей центральной части сварочной ванны поверхностное натяжение здесь будет возрастать, что приведет к появлению центростремительного потока Марангони. Это еще раз свидетельствует о том, что увеличение провара при сварке с флюсом не связано с уменьшением поверхностного натяжения расплавленного металла в сварочной ванне и образования в нем более глубокого кратера [15, 34].

Детально исследовав влияние поверхностно-активных элементов на форму швов, авторы работы [35] установили, что, например, селен способствует получению узких и глубоких швов на нержавеющей стали при TIG сварке и лазерной сварке, и подтвердили реальность модели проплавления за счет течений металла в сварочной ванне, обусловленных градиентами поверхностного натяжения. Однако при некоторых режимах сварки, например, при больших значениях сварочного тока доминирующими в механизме проплавления становятся другие факторы, в частности сила Лоренца. В работе [35] отмечается также отсутствие каких-либо данных о влиянии потоков жидкого металла при TIG сварке цветных металлов.

В предположении, что форма шва при TIG сварке определяется главным образом конвективными течениями в сварочной ванне, авторы работ [36, 37] рассмотрели возможные движущие силы этих течений. К ним относят аэродинамическое сопротивление, вызванное катодными потоками в дуге (силу трения), силу выталкивания, возникающую в связи с разной плотностью металла в ванне (плавучесть), электромагнитную силу Лоренца и градиент поверхностного натяжения жидкого металла. При этом сила трения и выталкивания во всех случаях направлены от центра ванны наружу, а сила Лоренца — от периферии к центру сварочной ванны.

Направление действия сил, вызванных градиентом поверхностного натяжения, зависит от наличия и концентрации поверхностно-активных примесей в металле и распределения температуры в сварочной ванне. Сила выталкивания, как правило, незначительна, ею пренебрегают и рассматривают баланс трех сил.

При обычной TIG сварке под действием катодного потока и эффекта Марангони конвекция в сварочной ванне имеет центростремительное направление, а теплота, поступающая от дуги, переносится на периферию сварочной ванны. В результате образуются широкие и неглубокие швы. Под действием же поверхностно-активных элементов, в частности кислорода, содержащегося во флюсах для сварки сталей, происходит изменение градиента поверхностного натяжения и, как следствие, направления течения Марангони. Оно подавляет центростремительную конвекцию от катодного потока. Тепло

дуги переносится в центр и вглубь сварочной ванны, увеличивается провар и уменьшается ширина шва. При сварке с использованием флюса следует также учитывать увеличение силы Лоренца [38] в результате повышения плотности тока на аноде, что также способствует углублению провара и уменьшению ширины швов.

Влияние давления дуги при TIG сварке на форму швов наиболее подробно рассмотрено в работе [38]. Во всех исследованиях, посвященных этому вопросу, речь идет не о давлении как таковом, а о силовом воздействии дуги на анод (свариваемый металл). Оно складывается из скоростного напора газового потока (газодинамические силы) и объемных электромагнитных сил, возникающих в проводнике при взаимодействии тока с собственным магнитным полем.

В сварочной дуге конической формы появляется продольная составляющая электромагнитной силы, направленная в сторону сварочной ванны. Такая же сила возникала и в самой ванне, вызывая в ней центростремительное движение жидкого металла. Эта сила (сила Лоренца) возрастает с увеличением сварочного тока и его плотности [39–41].

Принимая это во внимание, авторы работы [17] высказали предположение о том, что флюсы способствуют резкому увеличению силы Лоренца, возникновению направленного вглубь сварочной ванны потока жидкого металла и, следовательно, тепла, увеличению проплавления и уменьшению ширины швов.

Если флюс содержит поверхностно-активные (для свариваемого металла) элементы в достаточном количестве и температурная зависимость поверхностного натяжения жидкого металла возрастающая, возникает течение Марангони, направленное от периферии ванны к центру.

В этом случае потоки жидкого металла и тепла, обусловленные силой Лоренца и градиентом поверхностного натяжения, складываются, формируется глубокий и узкий шов. Если же в результате испарения в наиболее нагретом центральном участке ванны количество поверхностно-активных элементов будет меньше, чем на периферии, или в составе флюса вообще нет таких элементов, то направление течения Марангони изменится. В этом случае потоки жидкого металла и тепла, обусловленные силой Лоренца и градиентом поверхностного натяжения, имеют противоположные направления, а форма шва определяется разностью этих потоков.

Таким образом, высокая проплавляющая способность дуги при TIG-F сварке обусловлена ростом силы Лоренца в результате контракции дуги и увеличения плотности тока на аноде. Возможный переход поверхностно-активных элементов из флюса в сварочную ванну и их влияние на градиент поверхностного натяжения расплавленного металла не являются определяющими для формирования швов.

1. Гуревич С. М., Замков В. Н., Кушниренко Н. А. Повышение эффективности проплавления титановых сплавов при аргоно-дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 1–5.



2. Гуревич С. М., Замков В. Н. Некоторые особенности сварки титана неплавящимся электродом с применением флюсов // Там же. — 1966. — № 12. — С. 13–16.
3. Макара А. М., Кушнirenко Б. Н., Замков В. Н. Аргонодуговая сварка высокопрочных сталей мартенситного класса с применением флюса // Там же. — 1968. — № 7. — С. 73–74.
4. Илюшенко В. М., Васильченко В. В., Седов В. Е. Влияние некоторых фторидов на проплавление меди при аргонодуговой сварке // Там же. — 1981. — № 2. — С. 70–71.
5. Сварка меди неплавящимся электродом с использованием флюсов-паст / В. М. Илюшенко, В. В. Васильченко, В. Е. Седов и др. // Свароч. пр-во. — 1984. — № 4. — С. 27–28.
6. Lucas W., Howse D. Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes // Welding & Metal Fabrication. — 1996. — № 1. — P. 11–17.
7. Paskell T., Lundin C., Castner H. GTAW flux increases weld joint penetration // Welding J. — 1997. — № 4. — P. 57–62.
8. Effect of flux on A-TIG of mild steels / D. Fan, R. Zhang, Y. Gu, M. Ushio // Transactions of JWRI. — 2001. — № 30. — № 1. — P. 35–40.
9. Le soudage A-TIG de l'acier inoxydable superduplex UR52N / R. Saidov, H. Mourtou, R. Le Gall, G. Saïndernan // Soudage et Techniques Connexes. — 1999. — Juil./Aout. — P. 4–8.
10. Paton B. E., Zamkov V. N., Priloutsy V. P. Le soudage A-TIG titane et de ses alliages // Ibid. — 1998. — Nov./Dec. — P. 23–26.
11. Васильченко В. В., Седов В. Е. Исследование особенностей применения фторидов при АДС меди // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. 2-й Всесоюз. конф. (Киев, 1985). — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 352–357.
12. Adams A. E. NJC flux reduces distortion on turbine engine housing for defense contractor // Welding J. — 2000. — № 1. — P. 92.
13. Marya M. Theoretical and experimental assessment of chloride effects in the A-TIG welding of magnesium. — S. 1., [2002]. — 15 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-594).
14. Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Гуревич С. М. Влияние состава флюса на процесс сварки титана неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1977. — № 4. — С. 22–26.
15. Савицкий М. М., Лесков Г. И. Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом // Там же. — 1980. — № 9. — С. 17–22.
16. Влияние активирующих флюсов на строение сварочной дуги, горящей в аргоне / Ю. В. Казаков, В. И. Столбов, К. Б. Корягин и др. // Свароч. пр-во. — 1985. — № 4. — С. 30–32.
17. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Там же. — 1977. — № 3. — С. 3–4.
18. Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Распределение плотности тока в анодном пятне при дуговой сварке титана // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 19–22.
19. Влияние флюсов на температуру и плотность тока в столбе дуги при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом / Л. Е. Ерошенко, В. П. Прилуцкий, В. Ю. Белоус, В. Н. Замков // Автомат. сварка. — 2001. — № 6. — С. 3–6.
20. Lowke J. J., Tanaka M., Ushio M. Predictions of weld depth in TIG arcs from unified arc-electrode calculations. — S. 1., [2001]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-212-995).
21. Oxide flux quantity and size effects on the penetration depth in A-TIG welding / L. U. Shaping, F. Hidetoshi, T. Manabu, N. Kiyoshi // Transactions of JWRI. — 2002. — № 31. — № 2. — P. 187–192.
22. Прилуцкий В. П., Замков В. Н., Гуревич С. М. Аргонодуговая сварка титановых сплавов с применением присадочной порошковой проволоки // Автомат. сварка. — 1975. — № 7. — С. 41–44.
23. Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне / Б. Е. Патон, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, П. В. Порицкий // Там же. — 2000. — № 1. — С. 3–9.
24. Симоник А. Г., Петвиашвили В. И., Иванов А. А. Эффект контракции дугового разряда при введении электроотрицательных элементов // Свароч. пр-во. — 1976. — № 3. — С. 49–51.
25. Скворцов Е. А. Влияние фторидов щелочных металлов на процессы в дуговой плазме при аргонодуговой сварке титановых сплавов // Там же. — 1998. — № 7. — С. 25–29.
26. Исследование спектра дуговой плазмы при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом по флюсу / Л. Е. Ерошенко, В. Н. Замков, В. С. Мечев, В. П. Прилуцкий // Автомат. сварка. — 1980. — № 9. — С. 23–25.
27. А. с. 321069 СССР, МПК В 23 К 35/36. Флюс для электродуговой сварки / В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, Б. Н. Кушнirenко и др. — Опубл. 28.07.72; Бюл. № 23.
28. Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н. Изучение процессов в дуге при сварке титана неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1994. — № 4. — С. 3–5.
29. Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н. Исследование свечения вольфрамового катода в дуговом промежутке сварочной дуги в аргоне // Там же. — 1996. — № 5. — С. 8–12.
30. Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н. Исследование свечения паров анода в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса // Там же. — 1997. — № 11. — С. 11–13.
31. Исследование свечения паров анода для оценки технологических характеристик дуги в аргоне / Л. Е. Ерошенко, В. Н. Замков, В. С. Мечев, В. П. Прилуцкий // Там же. — 1979. — № 9. — С. 33–35.
32. Anderson P. C. J., Wictorovich R. Improving productivity with A-TIG welding // Welding & Metal Fabrication. — 1996. — March. — P. 108–109.
33. Heiple C. R., Roper J. R. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry // Welding J. — 1982. — № 4. — P. 97–102.
34. Савицкий М. М., Кушнirenко Б. Н., Олейник О. И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20–28.
35. Surface active element effects on the shape of GTA, laser, and electron beam welds / C. R. Heiple, J. R. Roper, R. T. Stagner, R. J. Aden // Welding J. — 1983. — № 3. — P. 72–77.
36. Tanaka M. Effects of activating flux on weld penetration in TIG welding process // J. JWS. — 2002. — № 71. — № 2. — P. 25–33.
37. Modenesi P. J., Apolinario E. R. Estudo da Soldagem A-TIG com Fluxos de um Componente // Soldagem & Inspecao-ano 5. — 1999. — № 9. — P. 9–16.
38. Ishizaki K. A new approach to the mechanism of penetration // Weld pool chemistry and metallurgy: Intern. conf. (London, 1980, 15–17 Apr.). — Cambridge, 1980. — P. 65–76.
39. Savage W. F., Nippes E. F., Agusa K. Effect of arc force on defect formation in GTA welding // Welding J. — 1979. — № 7. — P. 212–224.
40. Ерохин А. А. Силовое воздействие дуги на расплавляемый металл // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 21–26.
41. Burleigh T. D., Eagar T. W. Measurement of the force exerted by a welding arc // Metallurg. Trans. A. — 1983. — June. — № 14(6). — P. 1223–1224.

Results of investigations of effect of fluxes on the process of arc welding with tungsten electrode in argon are considered. A special attention was paid to the analysis of causes which increase the technological characteristics of arc by flux, in particular the increase in penetration depth. It is supposed that the latter is stipulated by a growth in Lorentz force due to arc contraction by flux and increase in current density in the anode region. Effect of change in gradient of surface tension of molten metal in weld pool on penetration is of a secondary importance.

Поступила в редакцию 11.06.2004



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены марки и общая характеристика свариваемости новых высокопрочных алюминиевых сплавов, физико-металлургические процессы, происходящие при их сварке, причины возникновения и меры предотвращения пористости в металле шва при сварке плавлением, особенности кристаллизации швов многокомпонентных сплавов, образование и меры предотвращения горячих трещин, химической и структурной неоднородности. Проанализированы структурные превращения, приводящие к разупрочнению металла в зоне термического влияния сварки. Дана характеристика новых и усовершенствованных способов и технологий сварки с использованием электрической дуги, электронно-лучевых и лазерных источников нагрева.

Ключевые слова: дуговая сварка, алюминий, сплавы, системы легирования, микроструктура, механические свойства, свариваемость, пористость, горячие трещины, прочность соединений, аэрокосмическая техника, транспортные системы

Алюминий и его сплавы по производству и потреблению занимают второе место после стали. Благодаря ценному комплексу физико-механических, коррозионных и технологических свойств легкие сплавы на основе алюминия успешно используются не только при создании летательных аппаратов, но и в других отраслях промышленности (в строительстве, военной технике, судостроении, производстве автомобильного и железнодорожного транспорта, электротехнике, при изготовлении криогенной и химической аппаратуры, в сельскохозяйственном и пищевом машиностроении и т. д.).

Большинство изделий производится из деформированных полуфабрикатов толщиной от 0,8 до 50,0 мм с применением различных способов сварки плавлением. Для этой цели, кроме хорошо известных дуговых способов, разработаны и успешно применяются в производстве новые технологические процессы и аппаратура. Среди них — плазменная, импульсно-дуговая, контактная стыковая, электронно-лучевая (ЭЛС), лазерная и др. Каждый из этих способов используется для выполнения соединений различной формы, толщины и протяженности.

Сфера применения новых и усовершенствованных способов сварки непрерывно расширяется. Так, например, ЭЛС теперь применяют не только для изготовления малогабаритных деталей и узлов, но и в производстве крупных изделий из алюминиевых полуфабрикатов толщиной до 300 мм. Интенсивно осваиваются лазерно-дуговые технологии. Для дальнейшего укрепления позиций алюминия в самолетостроении ускоренными темпами развиваются работы по совершенствованию технологии производства полуфабрикатов и созданию новых более прочных алюминиево-литиевых сплавов, сплавов предельно высокого легирования и гранулируемых. По прогнозам, уже в начале XX в. объем использования таких сплавов и композицион-

ных материалов на основе алюминия в конструкции планера самолетов составит около 50 %.

Распространению указанных материалов в производстве ответственных изделий способствуют интенсивные исследования свариваемости и разработка эффективных мер по предотвращению образования горячих трещин и пор в швах, а также по повышению прочности и надежности сварных соединений. Основы металлургического подхода к решению проблем свариваемости плавлением алюминиевых сплавов заложены в работах [1–10].

Характеристика свариваемости некоторых алюминиевых сплавов. Алюминий и его сплавы по способам получения полуфабрикатов делят на литейные и деформируемые, а в зависимости от применения упрочняющей термической обработки — на упрочняемые и неупрочняемые. Обычно термообработка включает закалку и последующее естественное или искусственное старение. Сварку сложных узлов чаще всего осуществляют после полного цикла термообработки заготовок. В некоторых случаях искусственное старение выполняют после сварки, что способствует повышению прочности сварных соединений. Сваренные детали простой формы могут быть упрочнены путем закалки и старения. В этом случае возможно получение равнопрочных с основным металлом сварных соединений.

Данные о химическом составе и свойствах серийных сплавов различных марок, используемых в России и Украине, содержатся в ГОСТ 4784–97 «Алюминиевые деформируемые сплавы» и в справочниках [11, 12]. Составы широко используемых в аэрокосмическом производстве сплавов приведены в табл. 1. Прочность этой группы сплавов в листах изменяется в широких пределах — от 430 до 610 МПа. Многие из них, например сплав В95, чрезмерно склонны к образованию горячих трещин при сварке плавлением. Совершенствование композиции сплава, подобного В96ц-З этой системы легирования (табл. 2), позволило путем введения циркония и других добавок повысить прочность пресс-профилей до 760...780 МПа, однако улучшение свариваемости таких сплавов пока остается актуальной задачей.



Таблица 1. Химический состав некоторых высокопрочных алюминиевых сплавов [2, 13]

Марка сплава	Массовая доля элементов, %											Прочие примеси (сумма), не более, %
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Li	Ti	Ni	
2024	—	1,50	4,40	0,60	—	—	0,50	0,50	—	—	—	—
Д16	0,30	1,50	4,35	0,60	—	—	0,50	0,50	—	0,10	0,10	0,10
2124	—	1,50	4,10	0,60	—	—	0,30	0,20	—	—	—	—
1161	0,10	1,50	4,15	0,60	—	—	0,30	0,20	—	0,10	0,05	0,10
2324	—	1,50	4,10	0,60	—	—	0,12	0,10	—	—	—	—
1163	0,10	1,50	4,15	0,60	—	—	0,15	0,10	—	0,04	0,05	0,10
7079	4,30	3,30	0,60	0,20	0,175	—	0,40	0,30	—	—	—	0,10
7075	5,60	2,50	1,60	—	0,230	—	0,40	0,40	—	—	—	—
В95	6,00	2,30	1,70	0,40	0,170	—	0,50	0,50	—	—	0,10	0,10
7050	6,20	2,25	2,30	—	—	0,01	0,15	0,12	—	—	—	—
В95пч	5,75	2,30	1,70	0,40	0,170	—	0,15	0,10	—	0,05	0,10	0,10
7150	6,40	2,35	2,20	—	—	0,10	0,15	0,12	—	—	—	—
В95оч	5,75	2,30	1,70	0,40	0,170	—	0,10	0,10	—	0,05	0,10	0,10
7475	5,70	2,25	1,60	—	0,210	—	0,12	0,10	—	—	—	—
В93пч	6,90	1,90	1,00	0,10	—	—	0,30	0,10	—	0,10	—	0,10
7055	8,00	2,05	2,30	—	—	0,10	0,15	0,10	—	—	—	—
В96цз	8,10	2,00	1,70	0,05	0,050	0,15	0,20	0,10	—	0,05	—	0,10
Х7093	9,00	2,50	1,50	—	—	0,10	0,15	0,12	—	—	0,20	—
В96Цпч	8,50	2,15	2,30	0,10	0,050	0,15	0,15	0,10	—	—	—	0,10
2090	—	—	2,70	—	—	0,10	0,12	0,10	2,20	—	—	—
2091	—	1,50	2,10	—	—	0,10	0,30	0,20	2,00	—	—	—
8090	—	0,90	1,30	—	—	0,10	0,30	0,20	2,40	—	—	—
1420	—	5,25	0,05	—	—	0,10	0,20	0,15	2,05	—	0,10	0,15
1424	—	3,20	—	—	—	0,10	0,30	0,10	1,80	—	—	0,20 (Sc)
1441	—	0,90	1,70	—	—	0,10	0,30	0,10	1,90	—	—	—
1460	—	0,05	2,80	—	—	0,10	0,12	0,10	2,20	0,06	—	0,08 (Sc)
2195	0,25	0,40	4,20	—	—	0,10	0,15	0,12	1,20	—	—	0,40 (Ag)
01570	—	6,00	—	0,20	—	0,10	0,20	0,15	—	—	—	0,30 (Sc)

Таблица 2. Механические свойства высокопрочных прессованных и катаных полуфабрикатов из сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu [2, 3]

Марка сплава	Тип полуфабриката	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_c^y , МПа $\sqrt{м}$	МЦУ, цикл	КНКР, МПа
1973 T2	Профиль	580	550	12	130	220	147
	Плита	560	520	10	124	220	147
	Лист	560	520	10	112	220	—
В95оч T2	Профиль	560	510	12	130	200	172
	Плита	540	490	11	124	160	172
	Лист	540	490	11	112	160	—
В96ц-3 T2 T12	Панель	610	580	10	109	200	167
	Профиль	660	630	10	109	—	117
В96ц-1 T2	»»	670	620	8	57	200	167

Примечание. Здесь K_c^y — условный показатель вязкости разрушения; МЦУ — малоцикловая усталость (количество циклов до разрушения при испытании образцов с концентратором $K_t = 2,6$ при $\sigma = 160$ МПа); КНКР — коэффициент напряжения коррозионного растрескивания.

Новые сплавы 01570 (Al–Mg) и 01970 (Al–Zn–Mg) служат примерами, подтверждающими положительную роль добавок в количестве 0,15... 0,30 % скандия для повышения прочности полуфабрикатов и улучшения их свариваемости

[14–16]. Сплав 01570 в отожженном состоянии по уровню прочности близок к термически упрочняемым сплавам. Листы имеют временное сопротивление около 420 МПа, удлинение — 20 %. Коэффициент прочности $K_{пр}$ сварных соединений



Таблица 3. Сравнительный анализ механических испытаний листов толщиной 3 мм и сварных соединений из сплавов 01570 (Sc) и АМг6

Марка сплава	Основной материал			Сварное соединение		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Присадочная проволока	σ_b , МПа	Угол загиба, град
01570	421,4	313,6	20,0	1571	398,0	140
АМг6	343,0	166,6	25,0	СвАМг6	336,1	140

Таблица 4. Влияние скандия на механические свойства пресс-профилей из опытных сплавов Al-Zn-Mg-Cu в состоянии после термической обработки по режиму Т6

Опытный сплав	Массовая доля элементов, %						Механические свойства		
	Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Sc	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	8,8	2,7	2,4	0,2	0,18	—	728	649	8,9
2	8,9	2,6	2,4	0,19	0,15	0,31	763	690	8,4

составляет 0,85...0,95. По этим характеристикам сплав намного превосходит подобный сплав АМг6 без скандия (табл. 3).

Сплав 01970 отличается более высоким уровнем прочности среди известных хорошо свариваемых алюминиевых сплавов. Листы после искусственного старения имеют временное сопротивление 520 МПа, предел текучести — 480 МПа, удлинение — 12 %, K_{1c} — 97 МПа $\sqrt{м}$. Оба сплава хорошо свариваются. Временное сопротивление сварных соединений листов из сплава 01970 после естественного старения в течение 1 мес достигает 420 МПа, угол загиба — 8°, ударная вязкость металла шва — 23 Дж/см². Они имеют высокое сопротивление коррозии под напряжением.

Следует отметить, что положительное влияние скандия на прочность полуфабрикатов отмечается и у высоколегированных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu (табл. 4).

Алюминиево-литиевые сплавы представляют собой особую группу сплавов в связи с наличием в их составе щелочного металла, который придает особые свойства полуфабрикатам [16, 17]. Например, их удельная масса резко уменьшается, а модуль упругости и удельный модуль так же резко

повышаются с увеличением количества лития в сплаве. Именно это обстоятельство привлекает к сплавам внимание конструкторов новой техники, особенно летательных аппаратов.

Все сплавы этой группы (см. табл. 1) являются термически упрочняемыми и характеризуются сравнительно высоким уровнем механических свойств. Три серии сплавов различных систем легирования, приведенных в табл. 5, отличаются от других алюминиево-литиевых сплавов возможностью удовлетворительной сварки [18].

По склонности к образованию горячих трещин в швах в порядке увеличения этого показателя они располагаются следующим образом: 1420, 1460, 1440. Уровень разупрочнения материала при сварке меньше у сплавов серии 1420, больший — у сплавов 1440. Следовательно, сварку сложнолегированных сплавов серии 1440 предпочтительно выполнять при минимальной погонной энергии электронно-лучевым или лазерным способом.

Сплав 1420 системы Al-Mg-Li имеет удельную массу на 12 % ниже, а модуль упругости на 8 % выше, чем используемый в самолетостроении дуралюмин Д16. Сплав характеризуется высокой коррозионной стойкостью, о чем свидетельствует успешный опыт эксплуатации самолетов вертикального взлета, выполненных из этого сплава, которые базируются на морских кораблях начиная с 1970-х гг. [4].

Из сплава 1420 и его модификаций освоен выпуск широкого ассортимента листов, в том числе для формовки в сверхпластичном состоянии. Листы имеют прочность, предел текучести и удлинение, близкие к указанным параметрам дуралюминов, и очень низкую скорость распространения усталостной трещины. Этот показатель очень важен для авиационных конструкций, рассчитываемых по принципу безопасной повреждаемости. Сопротивление повторным нагружениям — малоцикловая усталость — у сплава 1420 ниже, чем у дуралюминов.

Модификации сплава под номерами 1421 и 1423 [18], дополнительно легированные скандием, имеют более высокие значения временного сопротивления и предела текучести, чем базовый сплав 1420. Новая модификация сплава 1424 системы Al-Mg-Li-Zr-Sc отличается пониженным содержанием лития, более высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью. Сплав планируют использовать для изготовления сварных оболочек фюзеляжей в перспективных самолетах.

Сплавы серии 1440 системы Al-Cu-Mg-Li близки по химическому составу, характеризуются хорошим сочетанием показателей прочности и надежности эксплуатации [4, 19]. Благодаря оптимальному соотношению основных легирующих компонентов, сплав 1441 пригоден для изготовления тонких плакированных листов способом рулонной прокатки. Он сохраняет

Таблица 5. Типичные механические свойства основного металла и сварных соединений листов из алюминиево-литиевых сплавов [2, 5, 23] при аргодуговой сварке

Марка сплава	Система легирования	Листы			σ_b сварного соединения, МПа	K_{np} сварного соединения
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %		
1420	Al-Mg-Li	454	330	14,5	310/280	0,70/0,62
1424		480	360	16,0	320/280	0,66/0,58
1440	Al-Cu-Mg-Li	480	400	17,6	282/262	0,58/0,55
1441		435	340	14,0	280/285	0,64/0,65
1460	Al-Cu-Li	525	457	8,0	295/249	0,56/0,47
1464		550	500	10,0	300/270	0,55/0,49

Примечания. 1. Образцы основного металла вырезаны вдоль направления проката. 2. Для сварных соединений в числителе приведены значения для металла швов с верхним валиком, в знаменателе — для металла зачищенных швов (без валиков).



свойства свежезакаленного состояния более длительный период, чем обычный дуралюмин Д16 (до 10...15 ч). Листы из сплава 1441 отличаются от дуралюмина меньшей (на 7 %) удельной массой и более высокими значениями малоциклового усталости (на 50 %) и скорости распространения усталостных трещин (на 30 %). Сплав используют в производстве фюзеляжей военных самолетов, включая амфибии [4, 20].

При сварке без присадки сплавы 1440 и 1441 отличаются повышенной склонностью к образованию горячих трещин $A = 65\%$ [21]. Стойкость металла шва против образования горячих трещин можно повысить путем использования присадочной проволоки СвАМг63 ($A = 24\%$). Прочность соединений листов толщиной 6,5 мм при этом составляет 280 МПа, угол загиба — 50° , ударная вязкость металла шва — 14 Дж/см². Следует признать, что сплавы серии 1440 не рекомендуются для широкого использования в сварных конструкциях при обычных дуговых способах сварки. Предполагается возможность улучшения их характеристик свариваемости при ЭЛС или лазерной сварке с применением специальных присадочных материалов.

Сплавы серии 1460 относятся к системе Al—Cu—Li с добавками циркония и скандия. Они являются самыми высокопрочными свариваемыми термически упрочняемыми сплавами алюминий-литиевой группы [2–4]. Значения прочности основного металла находятся на уровне 540...600 МПа, что при плотности 2,6 г/см³ и модуле упругости 80 ГПа обеспечивает снижение массы конструкций на 15...20 % в случае замены других сплавов. Отличительной особенностью этого сплава является одновременное увеличение прочности и пластичности при криогенных температурах. Это делает его перспективным для использования в сварных криогенных баках. Модификации сплава 1464 отличаются от базового состава наличием комплекса модификаторов (до 0,15 %), что улучшает механические свойства полуфабрикатов и сварных соединений (см. табл. 5).

Сварные соединения сплава 1460, как и других термически упрочняемых свариваемых сплавов, имеют более низкие (60...80 %) значения прочности, чем основной металл, что зависит от термической обработки соединения после сварки и от самой технологии сварки [5, 22]. При использовании обычных присадок Св-1201 или СвАМг6 металл шва проявляет склонность к образованию горячих трещин. Применение более легированной присадочной проволоки Св-1217 (Al + 10 % Cu) приводит к существенному изменению химического состава шва, его механических и технологических характеристик. С повышением содержания меди в шве до 7...8 % одновременно увеличивается прочность соединений и повышается сопротивление металла шва образованию горячих трещин при сварке. Добавки скандия (0,5 %) и циркония (0,3 %) в присадки типа Св-1201 или СвАМг6 способствуют повышению сопротивления образованию горячих трещин при сварке и улучшению механических свойств соединений (табл. 6).

Таблица 6. Склонность к образованию горячих трещин при сварке алюминий-литиевых сплавов с использованием различных присадок

Марка сплава	Вид присадки	A, %
1420	Без присадки	44,5
	1420	32,0
	СвАМг63	17,0
	Al-6 Mg-0,5 Sc	5,00
1460	Без присадки	60,0
	СвАМг63	54,0
	Св-1201	50,0
	Al-10 Cu-0,5 Sc	15,0

Меры предотвращения образования включений оксидных плен в металле шва при сварке плавлением. Оксидные включения в металле шва являются наиболее распространенным дефектом сварных соединений алюминиевых сплавов. Они заметно снижают статическую и динамическую прочность, нарушают герметичность конструкций. Особенности и кинетика взаимодействия компонентов алюминиевых сплавов с газами окружающей среды изложены в монографиях [9, 10]. Количество и размеры включений в металле швов зависят от толщины и фазового состава поверхностной оксидной пленки, образующейся на деталях перед или в процессе сварки.

Исследовано окисление новых алюминиевых сплавов 1201 (Al—Cu), 1420 (Al—Mg—Li), 1460 и 1461 (Al—Cu—Li) при нагреве от 200 до 550 °С на воздухе и в аргоне [23, 24]. Наименьшая скорость окисления отмечается для сплава 1201. Сплав АМг6 окисляется по закону, близкому к линейному. Такая же зависимость, но при больших абсолютных изменениях массы образцов, зафиксирована для сплавов 1460 и 1461. Линейный закон окисления для сплава 1420 проявляется до температуры 400...420 °С. Затем происходит резкое возрастание скорости окисления сплава, и при 450...500 °С она увеличивается в 3...10 раз.

При сварке алюминий-литиевых сплавов, особенно сплава 1460, зачастую образуются протяженные (иногда непрерывные) включения оксидной пленки, ориентированные вдоль шва и расположенные в верхней средней части сечения сварного шва.

Как показали исследования [25, 26], разработанные меры предотвращения образования включений при дуговой сварке с присадкой различных алюминиевых сплавов оказались недостаточными для сплавов с литием и медью. Понадобилось создание более благоприятных условий для разрушения имеющихся оксидных плен на поверхности присадочной проволоки и предотвращения окисления расплавленного металла в сварочной ванне.

Радикальным способом оказался подогрев проволоки до 150...200 °С непосредственно в процессе сварки путем пропуска тока на участке протяженностью до 100 мм. В этом случае предотвращается захлаживание участка сварочной ванны в месте подачи присадки, повышается и выравнивается температура по всей поверхности, более интенсивно происходят процессы дегидратации и катодного разрушения оксидных плен на повер-

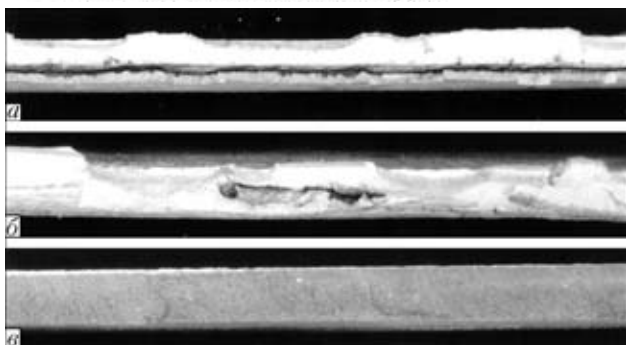


Рис. 1. Продольные изломы швов с включениями оксидных плен при обычной АДС вольфрамовым электродом (а, б) и свободные от включений при сварке с подогревом присадочной проволоки (в); листы из алюминиево-литиевого сплава 1460 толщиной 3 мм, присадка Sv-1201, Ø1,6 мм, X3

хностях проволоки и сварочной ванны, образование оксидов становится термодинамически маловероятным. В таких условиях получены швы, свободные от включений оксидов (рис. 1).

Причины и меры предотвращения пористости в металле шва. Основной причиной пористости считается водород, вернее его скачкообразное уменьшение растворимости в металле шва при затвердевании (кристаллизации) [9, 10], о чем свидетельствуют сравнительно мелкие поры, располагающиеся в металле шва вдоль границ послойной кристаллизации.

Иначе обстоит дело с крупными порами, которые чаще всего не связаны со слоями кристаллизации, а локализируются либо в верхней части шва, либо в зоне сплавления. Появление такой пористости обычно является следствием грубых нарушений оптимальных условий сварки, включая подготовку основного металла и сварочных проволок [27], а также высокого содержания газов в свариваемом металле [28].

Особенности и механизм образования пористости при сварке алюминиево-литиевых сплавов исследованы в многочисленных работах [29, 30]. Из анализа этих работ следует, что на поверхности полуфабрикатов образуется толстая и рыхлая оксидная пленка, способная адсорбировать большое количество влаги. На разных этапах производства полуфабрикатов в их поверхностных слоях могут появиться также химические соединения лития типа гидридов и гидрокарбонатов [28]. Наиболее вероятными местами их образования являются выделения вторичных фаз с большим содержанием лития по границам зерен. Поэтому соединения гидридов и другие проникают на значительную глубину, а приповерхностные слои обедняются металлическим литием. При нагреве во время сварки они выделяют пузырьки газа, которые образуются не только в сварочной ванне, но и в металле, нагретом до твердожидкого состояния в зоне термического влияния (ЗТВ). Иногда они вызывают всплывание металла в околошовной зоне на обратной стороне соединения. В верхней части соединения в приповерхностном слое металла поры обнаруживаются редко, а их размер значительно меньше, чем в корневой части. Это связано с вы-

ходом пузырьков газа на поверхность до полного затвердевания ванны.

При аргонодуговой сварке (АДС) стыков на технологической подкладке с формирующей канавкой обычно происходит сквозное проплавление металла. По мере нагрева и расплавления металла стадия образования и укрупнения пузырьков газа в зоне сплавления переходит в стадию дегазации сварочной ванны. Этот процесс зафиксирован визуально как всплывание пузырьков газа на поверхность ванны, где они и прекращают свое существование.

Более мелкие пузырьки, образующиеся в нижней части сварочной ванны, не успевают всплыть на поверхность из-за малой скорости их подъема. Незначительное перемещение металла в этой части ванны также способствует захвату пузырьков газа кристаллизующимся металлом, в результате чего образуются поры. Устранение такой пористости затруднено даже при многократном переплаве шва. Удалить их можно лишь после повторного проплавления металла со стороны корня шва.

Практически полностью можно избежать появления крупных пор как в верхней, так и в нижней части шва при удалении поверхностного слоя металла толщиной 0,2...0,3 мм. Уменьшение пористости швов таким образом нельзя признать эффективным с технико-экономической точки зрения.

В настоящее время разработаны способы сварки, не требующие механической или термовакuumной обработки листовых заготовок. Благодаря интенсивному электромагнитному воздействию на сварочную ванну сканирующей или пульсирующей дуги переменного асимметричного тока обеспечивается перемешивание всего объема сварочной ванны. При этом пузырьки газа легко отрываются от поверхности оплавленного металла и выносятся потоками жидкого металла на поверхность ванны [30]. Сварка пульсирующей дугой при обычной подготовке кромок и более эффективной защите зоны сварки с помощью аргона в значительной мере способствует предотвращению появления грубой пористости.

Особенности кристаллизации швов, меры предотвращения образования горячих трещин при сварке. К настоящему времени установлено, что горячие трещины при сварке плавлением алюминиевых сплавов образуются и распространяются на завершающем этапе кристаллизации шва и имеют межкристаллитный характер [9, 10, 31]. В связи с периодичностью кристаллизации шва горячие трещины могут возникать и прекращаться в пределах одного или нескольких слоев кристаллизации.

В некоторых случаях, связанных с неблагоприятным выбором присадочного материала, горячие трещины появляются в металле околошовной зоны (рис. 2, б), так как именно здесь оказывается зона «слабины» ввиду скопления легкоплавких фаз из основного металла. Предполагается, что такая крупная магистральная трещина может распространиться и в зону затвердевшего металла.

Зависимость склонности к образованию трещин от химического состава сплавов и условий сварки

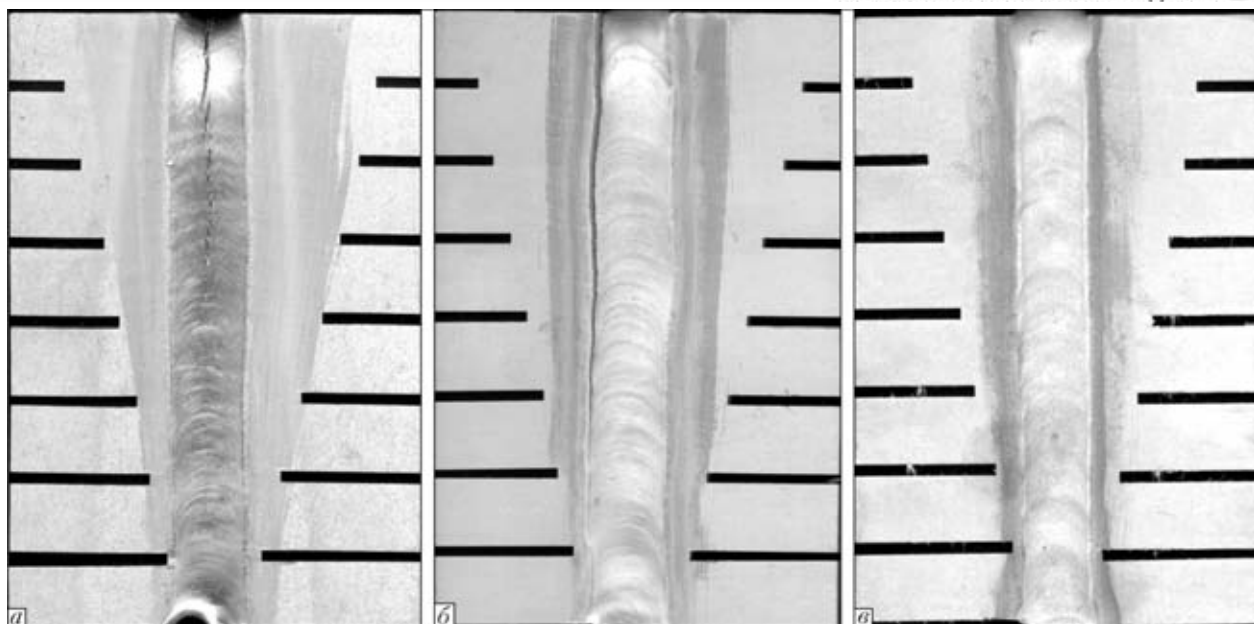


Рис. 2. Основные виды горячего растрескивания швов: *а* — обычное по центру шва; *б* — по границе сплавления основного металла и шва, может заходить в зону перегретого основного металла; *в* — без видимых трещин

описана в работах [32, 33]. Во многих алюминиевых сплавах обнаруживается неравномерность распределения примесей кремния и железа среди структурных составляющих металла шва и зоны сплавления. При этом образуются эвтектики сложного состава более легкоплавкие, чем в сплавах высокой чистоты по примесям. Это приводит к расширению температурного интервала кристаллизации за счет снижения температуры неравновесного солидуса и, как следствие, к повышению склонности металла шва к образованию горячих трещин. Например, в сплаве 1201 (Al + 6 % Cu) показатель горячеломкости по результатам испытания образцов Хоулдрокфта снизился от 38 до 19 % (в два раза) при уменьшении количества примесей железа и кремния от 0,2...0,3 % до 0,03...0,05 % (табл. 7). Результаты систематических исследований заставляют ограничивать количество неизбежных примесей кремния и железа до 0,05...0,10 % для улучшения свариваемости и механических свойств соединений высокопрочных сплавов различных систем легирования на основе алюминия.

Склонность к трещинообразованию при сварке плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов может быть уменьшена путем создания мелкокристаллической структуры швов, например, посредством использования пульсирующей или сканирующей дуги [34], присадочных проволок с высоким содержанием основных легирующих компонентов (магний, медь, кремний) [33, 35] или эффективных модификаторов таких, как скандий цирконий титан и др. [36].

Примером эффективного измельчения структуры швов является использование при сварке многих сплавов при-

садочной проволоки СвАМг63, содержащей, кроме титана, еще и до 0,3 % циркония (рис. 3). В настоящее время созданы присадочные материалы различных систем легирования (Al-Mg, Al-Cu, Al-Cu-Mg) с добавкой 0,3...0,6 % скандия, который является наиболее эффективным модификатором кристаллической структуры швов.

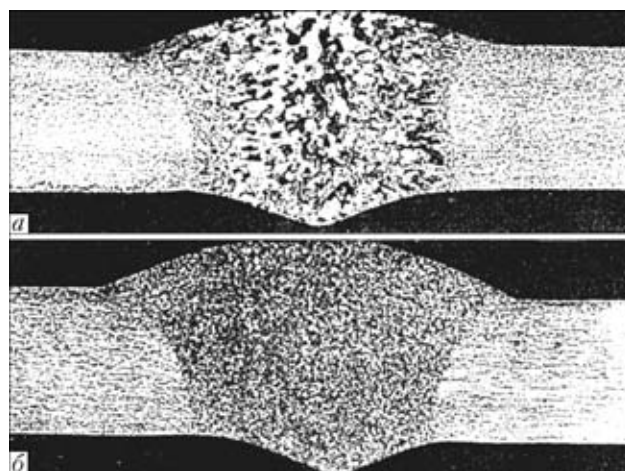


Рис. 3. Макрошлифы сварных соединений, полученных АДС неплавящимся электродом, листов из АМг63 толщиной 4 мм при использовании присадок СвАМг6 без циркония (*а*) и СвАМг63 с цирконием (*б*), $\times 6$

Таблица 7. Зависимость склонности к образованию горячих трещин в швах и механических свойств высокопрочных алюминиевых сплавов различных систем легирования от содержания примесей

Марка сплава (легирование)	Примеси, мас. %		А, %	Временное сопротивление σ_b , МПа	Пластичность α , град	Ударная вязкость a_k , Дж/см ²
	Fe	Si				
1201 (Al6CuMn)	0,05	0,03	19	454/298	65/78	21/20
	0,22	0,18	38	446/299	46/56	14/11
1160 (Al4,5Cu1,5Mg)	0,05	0,04	37	492/362	42/64	20/16
	0,25	0,20	58	485/339	26/48	15/10

Примечание. В числителе приведены данные для полуфабрикатов, в знаменателе — для сварных соединений.

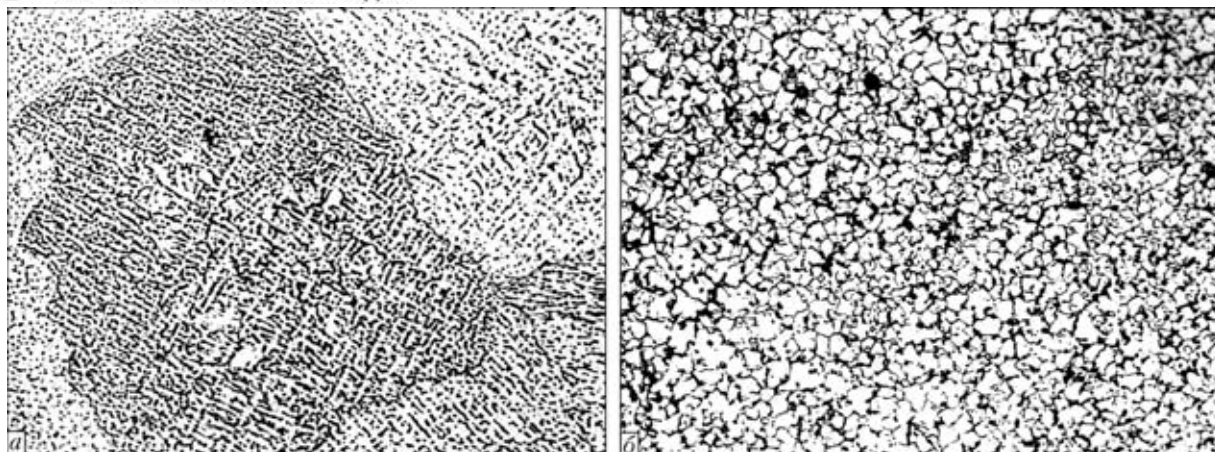


Рис. 4. Микроструктура металла шва при сварке плавлением сплавов системы Al-6Zn-2Mg-0,14Zr без присадки: *a* — крупнокристаллическая дендритная в сплаве без модификаторов; *б* — мелкокристаллическая субдендритная в сплаве с добавками модификаторов 0,15 % Zr и 0,35 % Sc, $\times 500$

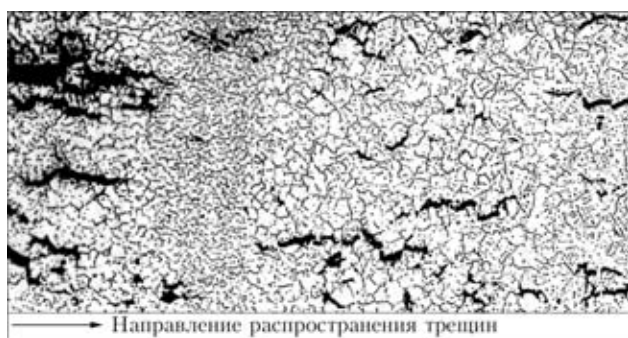


Рис. 5. Микроструктура металла шва со скандием (субдендритная структура с неразвившимися микротрещинами), $\times 100$

Как видно из рис. 4, применение таких присадок при сварке сплава Al-6Zn-2Mg обеспечивает переход структуры шва от крупнокристаллической дендритной (рис. 4, *a*) к мелкокристаллической субдендритной (рис. 4, *б*) с размером ячеек до 20...30 мкм (степень измельчения на один порядок). Такие структуры металла швов способствуют не только улучшению его механических свойств, но и хорошему сопротивлению развития горячих трещин (рис. 5). Согласно результатам сварки образцов Хоулдрокфта (см. рис. 2) показатель горячеломкости швов при сварке сплава В95 с использованием присадки из сплава Al-6Mg-0,5Sc колеблется от 0 до 15 %, что в три-четыре раза

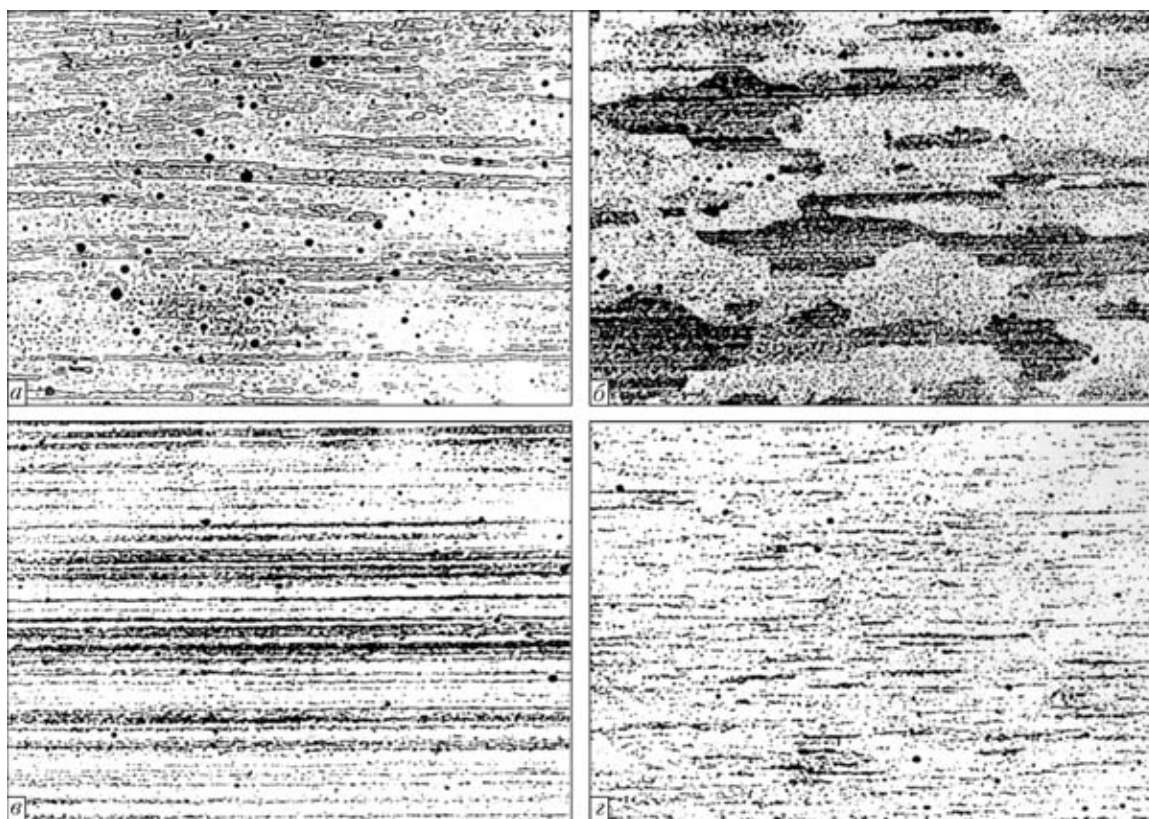


Рис. 6. Микроструктура холоднокатаных листов двух сплавов системы $\text{Al-8,0Zn-2,1Mg-1,9Cu-0,11Zr}$ (*a*, *б*) без скандия и со скандием $\text{Al-8,0Zn-2,1Mg-1,9Cu-0,11Zr-0,12Sc}$ (*в*, *г*) в исходном состоянии (*a*, *в*) и после нагрева до 500 °C в течение 30 мин (*б*, *г*), вызвавшего рекристаллизацию в сплаве без скандия (*б*), $\times 156$

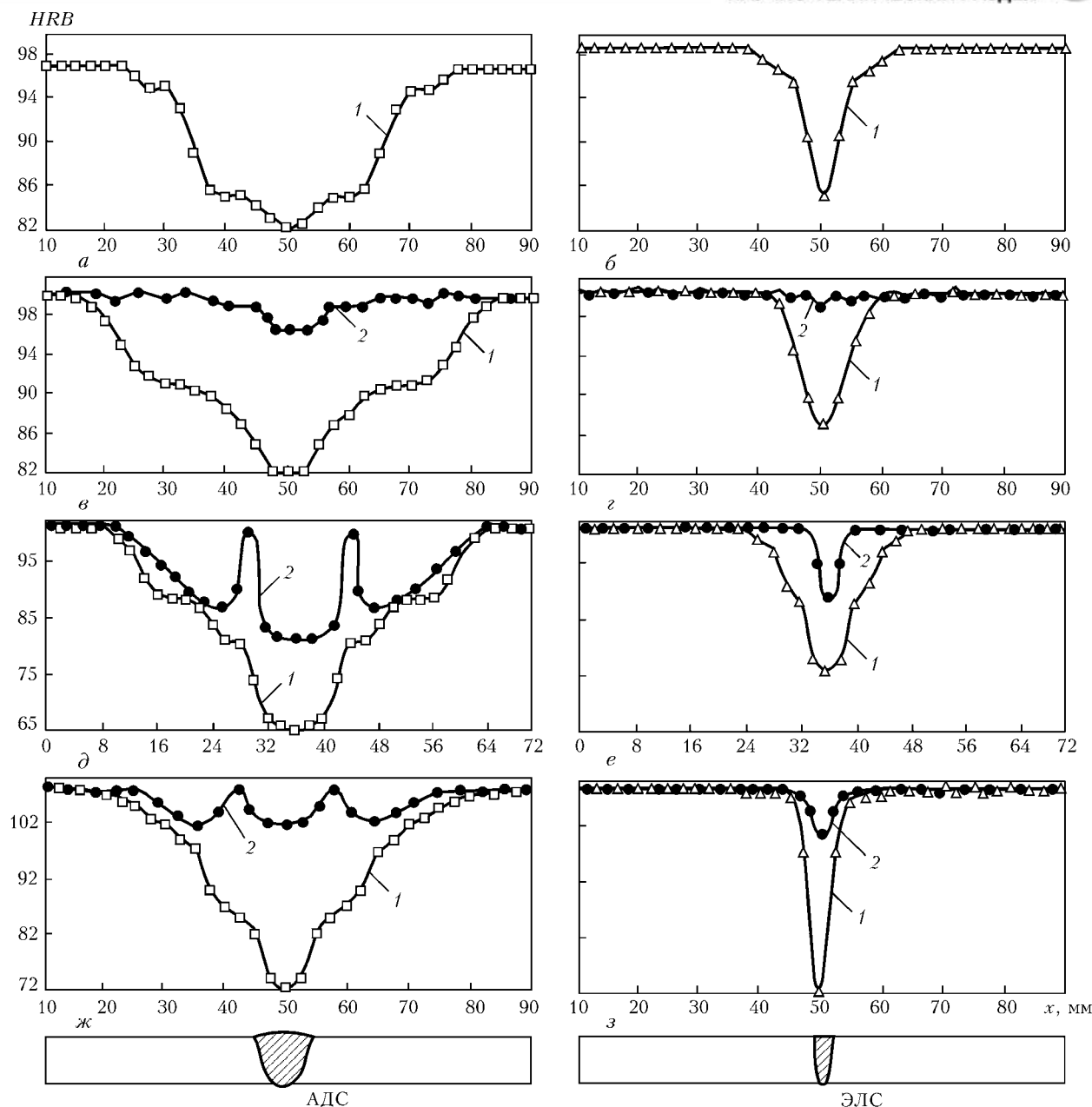


Рис. 7. Кривые изменения твердости металла сварных соединений при АДС (а, б, д, ж) и ЭЛС (б, з, е, з) алюминиевых сплавов АМг6Ні3Р (а, б), 1420 (б, з), 1201 (д, е), 1460 (ж, з): 1 — состояние непосредственно после сварки соответственно дуговым (□) и электронно-лучевым (Δ) способами; 2 — состояние после искусственного старения соединений, полученных обоими способами

меньше по сравнению с базовым вариантом при-
садки без скандия.

Следует отметить положительную роль скандия, который вводится в количестве 0,1...0,2 % в основной материал. Наличие скандия дает возможность избежать образования грубой структурной неоднородности в ЗТВ сварки, что обычно происходит вследствие рекристаллизации и сопутствующих процессов по границам зерен в деформированных полуфабрикатах без скандия (рис. 6).

Структурные превращения и разупрочнение металла в ЗТВ сварки. Полуфабрикаты из высокопрочных алюминиевых сплавов под воздействием сварочного нагрева разупрочняются в околошовной зоне. При этом результат нагартовки теряется полностью, а термическое упрочнение можно восстановить [37]. Различные способы свар-

ки по плотности энергии, а следовательно, и по степени термического влияния на свариваемый материал (обратная зависимость), располагаются на разных уровнях шкалы в диапазоне от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^7$ Вт/см² [38].

Что касается изменения механических свойств материала, его твердости и прочности, то оно зависит от особенностей структурных превращений в сплавах различных систем легирования. Как видно из рис. 7, в сварных соединениях сплава 1420 отсутствуют провалы на кривых изменения твердости в тех местах, где другие термически упрочняемые сплавы значительно разупрочняются вследствие перестаривания и частичного отжига. Можно предположить, что в этом сплаве на всем участке эффективного термического воздействия



Таблица 8. Сравнительные свойства алюминиевых сплавов и их сварных соединений (для криогенных баков ракет) [1, 2]

Марка сплава (состояние)	Температура испытания, К	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV , Дж/см ²
АМг6 (нагартовка 20 %)	293	420/296	252	15,0	22/16
	77	520/400	292	34,5	20/16
	20	590/420	325	14,0	15/10
1201 (термическое упрочнение)	293	420/280	325	9,5	12/17,5
	77	420/355	325	12,0	12/14,5
	20	610/405	440	15,0	14/14,8
1460 (термическое упрочнение)	293	530/290	495	10,0	11/10
	77	615/355	325	17,5	13/7
	20	760/385	560	13,5	15/6

Примечание. В числителе приведены значения σ_b разрыву и KCV для основного металла, в знаменателе — для аргонодуговых сварных соединений.

происходит возврат к закаленному состоянию. Это создает условия для восстановления твердости на всем протяжении ЗТВ при повторном искусственном старении основного металла в сварном соединении. Такая особенность превращений в сплаве 1420 обусловлена, вероятно, специфическим одностадийным механизмом выделения упрочняющей фазы, что открывает возможность получения высоких значений временного сопротивления сварных соединений (примерно 400 МПа).

Малая продолжительность воздействия температур сварочного цикла определяет специфику превращений по сравнению с изотермическими режимами нагрева. При таких температурно-временных условиях возможен частичный возврат состаренного сплава к закаленному состоянию и последующее его упрочнение при искусственном старении соединений [1]. Сварочный кратковременный нагрев до температур ниже 300 °С практически не изменяет структуру и твердость сплавов.

Для прогноза изменений твердости и прочности металла в ЗТВ разработаны термокинетические диаграммы разупрочнения сплавов 1201, 1420 и 1460 при нагреве в изотермических условиях [39–41]. Отмечается более высокая термическая стабильность сплава 1420 по сравнению с 1201 и 1460. Благодаря этому сварные соединения сплава 1420 имеют более высокий уровень прочности металла как в шве, так и в ЗТВ.

Реальная картина изменения физико-механических свойств некоторых рассматриваемых сплавов при АДС и ЭЛС представлена на рис. 7. Применительно к различным температурным ус-

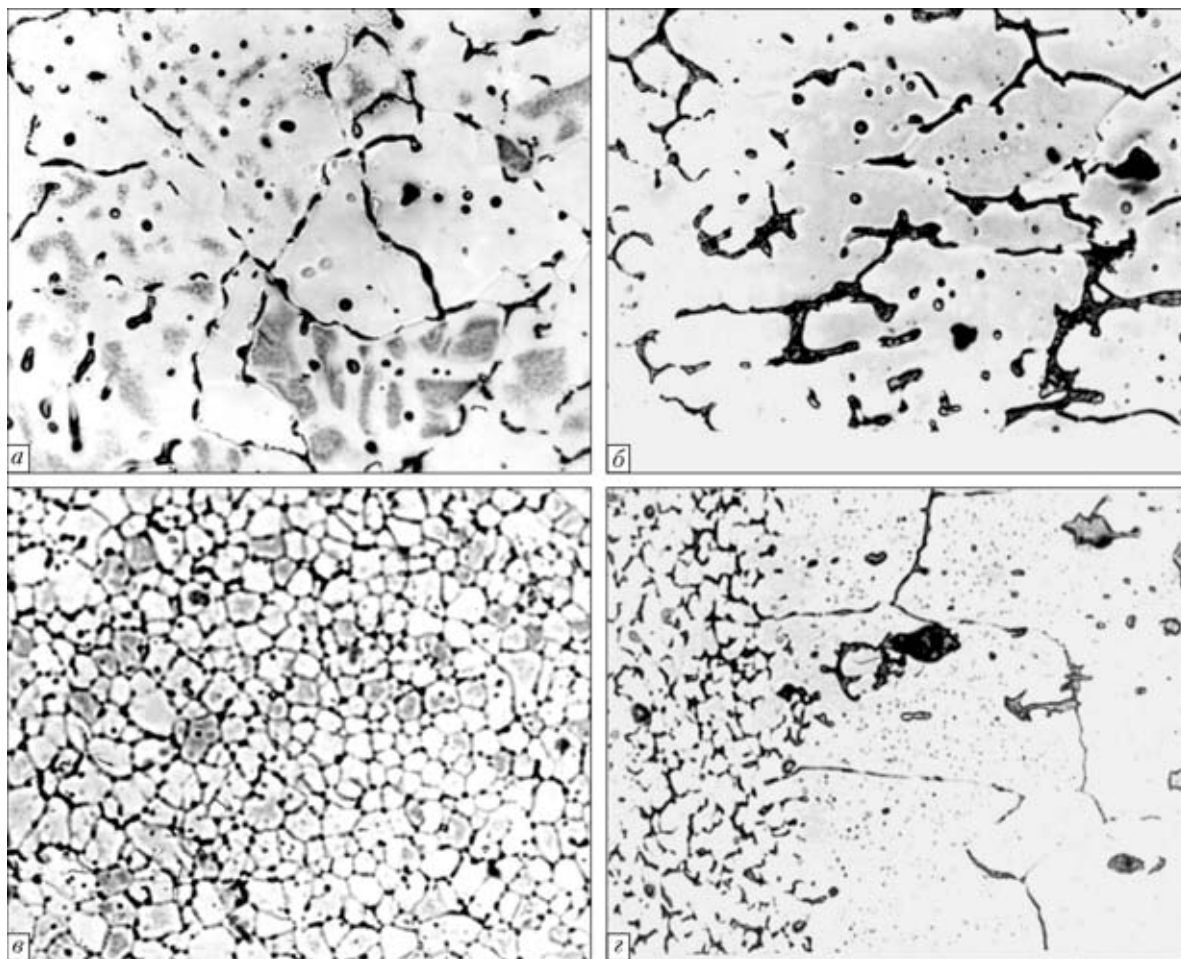


Рис. 8. Микроструктура металла шва (а, в) и зоны сплавления шва с основным металлом (б, г) листов из сплава 1201 толщиной 6 мм без присадки при АДС (а, б) и ЭЛС (в, г), $\times 500$

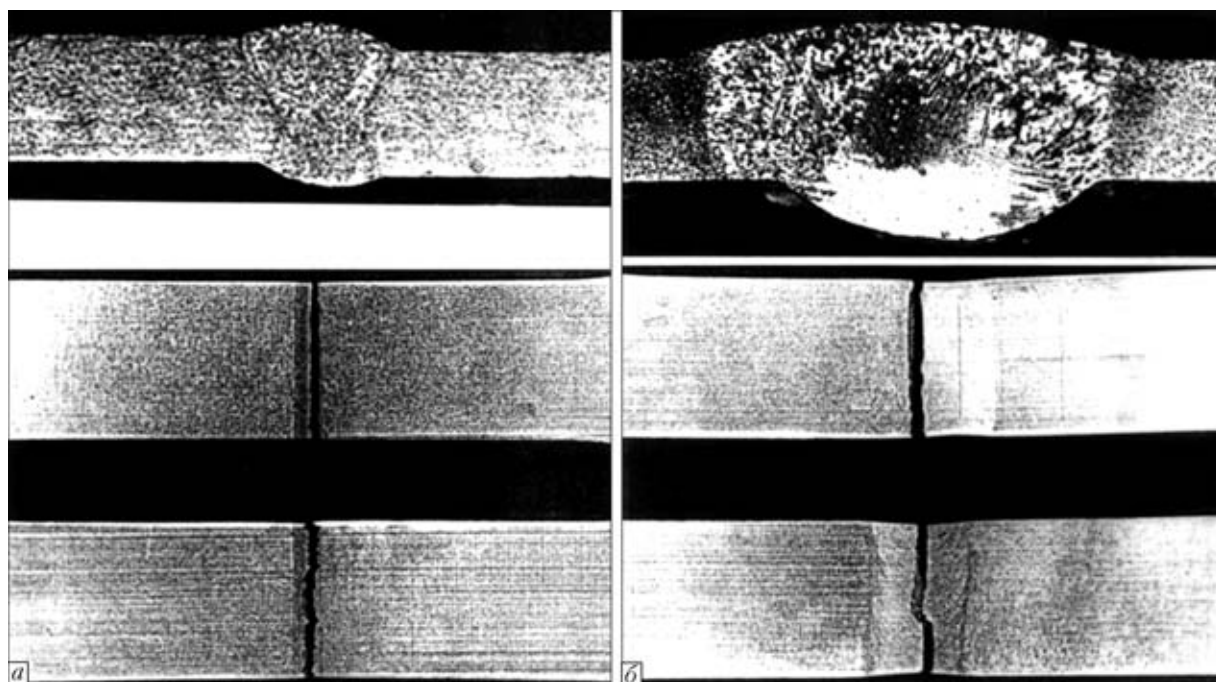


Рис. 9. Макроструктура сварных соединений сплава 1420 (X5) и виды разрушения образцов при растяжении (по зоне сплавления и по шву): а — лазерная сварка, $\sigma_b = 360...380$ МПа; б — АДС, $\sigma_b = 300...330$ МПа

ловиям эксплуатации, включая криогенные, значения основных характеристик механических свойств приведены в табл. 8. Они показывают, что перспективные баки ракет для жидкого водорода и другие изделия криогенной техники, работающие при низких температурах (4,2... 77,0 К), целесообразно изготавливать из сплавов 1201 и 1460.

Как показывают металлографические исследования (рис. 8), разрушение металла шва и околошовных зон происходит вследствие изменения исходной структуры полуфабрикатов. Крупнокристаллическая структура швов, рост зерен основного металла и формирование грубых межзеренных прослоек из легкоплавких фаз особенно заметны при АДС (рис. 8, а, б). При ЭЛС и, возможно, лазерной сварке (рис. 8, в, г) такие изменения выражены в меньшей мере, благодаря чему обеспечивается более высокий уровень исследованных характеристик сварных соединений (рис. 9).

Таким образом, результаты исследований и разработок свидетельствуют о создании оригинальных композиций сложнолегированных алюминиевых сплавов и аналогов известных сплавов различных систем легирования с микродобавками эффективных модифицирующих элементов скандия и циркония, которые отличаются более высокими характеристиками технологичности и прочности. Их свариваемость плавлением при использовании современных технологий характеризуется как хорошая или удовлетворительная, а временное сопротивление разрыву термически упрочненных деформированных полуфабрикатов достигает 750 МПа.

Среди перспективных систем сложного легирования как основы новых более высокопрочных свариваемых сплавов следует признать Al-Zn-Mg-Cu и Al-Cu-Mg-Li сплавы с микро-

добавками элементов переходной группы. Отличаясь удовлетворительными характеристиками свариваемости, они обеспечат прогрессивное развитие конструкций многих новых изделий транспортного назначения, таких, как аэробусы, вагоны скоростных поездов, изделия оборонного назначения, что повысит технические и экономические показатели их производства и эксплуатации.

1. *Сварка в самолетостроении* / Г. А. Кривов, В. Р. Рябов, А. Я. Ищенко и др.; Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: МИИВЦ, 1998. — 696 с.
2. *Фридляндер И. Н.* Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // *Технология легких сплавов*. — 2002. — № 4. — С. 12–17.
3. *Фридляндер И. Н., Белецкий В. М., Кривов Г. А.* Алюминиевые сплавы в авиационных конструкциях // *Технолог. системы*. — 2000. — № 1. — С. 5–17.
4. *Фридляндер И. Н.* Алюминиевые сплавы для авиационной техники // *Современное материаловедение. XXI век*. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 297–306.
5. *Ищенко А. Я., Лабура Т. М., Лозовская А. В.* Алюминий-литиевые сплавы для сварных конструкций аэрокосмической техники // *Автомат. сварка*. — 1995. — № 7. — С. 41–44.
6. *Ishchenko A. Ya., Labur T. M.* Weldable scandium-containing aluminium alloys // *Welding and Surfacing Rev.* — 1997. — V. 9. — 109 p.
7. *Kiyoto S.* Materials and joining technologies for rocket structures // *J. Jap. Welding Soc.* — 1993. — 62, № 8. — P. 46–52.
8. *Ищенко А. Я.* Исследования и разработки технологий сварки легких сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона // *Автомат. сварка*. — 2002. — № 12. — С. 30–31.
9. *Рабкин Д. М.* Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
10. *Никифоров Г. Д.* Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 264 с.
11. *Справочник по алюминиевым сплавам* / Под ред. В. И. Елагина. — М.: ВИЛС, 1978. — 132 с.
12. *Davis J. R.* Aluminum and aluminum alloys // *ASM International: Handbook committee. III Series. TA 480.A6A6177*. — 1994. — 620.1'86. — P. 20.
13. *Конструкционный сплав 1424* пониженной плотности системы Al-Mg-Li-Zr-Sc для сварных и клепаных конструкций авиакосмической техники / И. Н. Фридляндер,



- Л. Б. Хохладова, Н. И. Колобнев и др. // Технология легких сплавов. — 2002. — № 4. — С. 20–23.
14. Бондарев Б. И., Елагин В. И. Новые алюминиевые сплавы, легированные скандием // Там же. — 1992. — № 5. — С. 22–28.
15. Ищенко А. Я., Чапор В. О., Яворская М. Р. Влияние добавок скандия на свариваемость сплава системы Al–Zn–Mg // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 15–17.
16. Давыдов В. Г., Елагин В. И., Захаров В. В. Исследования ВИЛСа в области повышения свойств, качества и технологичности полуфабрикатов из алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. — 2001. — № 5/6. — С. 6–16.
17. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И. Н. Фридляндер, К. В. Чуистов, А. Л. Березина, Н. И. Колобнев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.
18. Ищенко А. Я., Чапю А. Г., Илюшенко Р. В. Свариваемость и технология дуговой сварки высокопрочного сплава системы алюминий-магний-литий // Автомат. сварка. — 1985. — № 10. — С. 47–49.
19. Лецинер Л. Н., Латушкина Л. В., Федоренко Т. П. Ресурсный высокотехнологичный сплав 1441 пониженной плотности системы Al–Cu–Mg–Li // Там же. — 1994. — № 3/4. — С. 38–42.
20. Алюминиево-литиевый сплав 1441 как перспективный материал для фюзеляжа / Р. К. Бирд, Д. Л. Дайкус, И. Н. Фридляндер, В. С. Сандлер // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 2001. — № 8. — С. 7–10.
21. Свариваемость листовых полуфабрикатов сплава 1440 / Н. Г. Третьяк, Р. В. Илюшенко, М. Р. Яворская и др. // Автомат. сварка. — 1995. — № 4. — С. 27–30.
22. Овчинников В. В., Дриц А. М., Крымова Т. В. Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминисево-литиевого сплава 1460 // Свароч. пр-во. — 1997. — № 12. — С. 26–43.
23. Покляцкий А. Г. Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — № 3. — С. 38–40.
24. Овчинников В. В., Гринин И. В., Федоров С. А. Особенности образования оксидных включений при дуговой сварке тонколистовых конструкции из алюминиевых сплавов // Свароч. пр-во. — 1993. — № 7. — С. 30–32.
25. Предотвращение образования включений оксидной пленки в швах при сварке алюминиевых сплавов пульсирующей дугой / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, А. С. Бессонов, Б. П. Ржанов // Автомат. сварка. — 1991. — № 7. — С. 43–47.
26. Покляцкий А. Г., Лозовская А. В., Гринюк А. А. Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов // Там же. — 2002. — № 12. — С. 21–26.
27. Кудряшов О. Н., Елисеев В. И., Виноградов В. С. Влияние технологии подготовки деталей на пористость швов при сварке сплава 1201 // Свароч. пр-во. — 1994. — № 3. — С. 19–21.
28. Об источниках порообразования при сварке деформируемых и литейных алюминиевых сплавов / В. И. Рязанцев, А. И. Савостиков, В. П. Чернов, Н. Н. Саратов // Там же. — 1993. — № 8. — С. 32–34.
29. Овчинников В. В., Редичи В. В. О двух механизмах образования зародышей газовых пузырьков при сварке алюминиевых сплавов, легированных литием // Там же. — 1991. — № 9. — С. 40–43.
30. Илюшенко Р. В. Влияние параметров режима сварки пульсирующей дугой в аргоне на пористость соединений сплава 1420 // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 27–30.
31. Ищенко А. Я., Лозовская А. В., Касьян В. В. Зависимость склонности алюминиевых сплавов к образованию сварочных трещин от характера кристаллизации вблизи солидуса // Технология легких сплавов. — 1981. — № 10. — С. 7–13.
32. Ищенко А. Я., Лозовская А. В. Улучшение свариваемости алюминиевых сплавов путем оптимизации количества примесей // Пробл. соврем. материаловед.: Тр. V сессии Науч. совета по новым материалам Междунар. ассоц. акад. наук (12 мая 2000 г., Киев). — Гомель: ИММС НАНБ, 2001. — С. 72–77.
33. Овчинников В. В., Рязанцев В. И., Алексеев В. В. К вопросу об образовании трещин в сварных соединениях сплава 1420 // Свароч. пр-во. — 1992. — № 5. — С. 41–43.
34. Современные способы дуговой сварки алюминиевых сплавов (Обзор) / А. Я. Ищенко, И. В. Довбищенко, В. П. Будник, В. С. Машин, А. Г. Покляцкий // Автомат. сварка. — 1994. — № 5/6. — С. 35–37.
35. Илюшенко Р. В., Третьяк Н. Г. Влияние состава присадочных материалов на горячеломкость сварных соединений алюминий-литиевых сплавов // Там же. — 1991. — № 7. — С. 27–29.
36. Ищенко А. Я., Лозовская А. В., Склабинская И. Е. Механизм торможения кристаллизационных трещин при сварке алюминиевых сплавов, содержащих скандий // Там же. — 1999. — № 8. — С. 13–16.
37. Повышение прочности швов при дуговой сварке сплава 1420 с применением скандийсодержащих присадок / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // Там же. — 2002. — № 1. — С. 11–15.
38. Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов (Обзор) // Там же. — 2001. — № 12. — С. 21–28.
39. Ищенко А. Я. Кинетика превращений при сварке термически упрочненного алюминиевого сплава 1201 // Там же. — 1980. — № 1. — С. 29–31.
40. Особенности структурных превращений при сварке алюминий-литиевых сплавов, содержащих скандий / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, Н. Г. Третьяк и др. // Технология легких сплавов. — 1993. — № 4/5. — С. 7–17.
41. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминисево-литиевых сплавов 1420 и 1460 / Т. М. Лабур, Андр. А. Бондарев, А. В. Лозовская и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 12–16.

Grades and general characteristic of weldability of new high-strength aluminium alloys, physical-metallurgical processes occurring in welding, causes of formation and measures for prevention of porosity in weld metal during fusion welding, peculiarities of solidification of welds in multicomponent alloys, as well as formation and measures for prevention of hot cracks, chemical and structural heterogeneity are considered. Structural transformations leading to weakening of metal in the HAZ are analysed. Characteristics of new and improved methods and technologies for welding using the electric arc, electron beam and laser heat sources are presented.

Поступила в редакцию 17.06.2004



РАЗРАБОТКА ПРИПОЕВ ДЛЯ ПАЙКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ТИТАНА

В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

В. Г. ИВАНЧЕНКО, д-р техн. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Проведены фундаментальные исследования сплавов систем Ni-Cr-Zr и Ti-Zr-Mn в областях содержания элементов, перспективных с точки зрения разработки припоев. Получены данные о температуре плавления сплавов, их фазовом составе и морфологических особенностях. На основе полученных результатов разработаны припои для пайки высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов и интерметаллидного сплава γ -TiAl. Исследованы структура и свойства паяных соединений.

Ключевые слова: высоколегированный жаропрочный никелевый сплав, эвтектика, твердый раствор, карбиды, упрочнение, ламельная структура, γ -фаза, дуговая пайка, вакуумная пайка, термообработка

Из многочисленных жаропрочных сплавов, применяемых в промышленности, наибольшее внимание привлекают сплавы, используемые для изготовления деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, в частности лопаток турбин. В настоящее время в большинстве случаев это высоколегированные никелевые сплавы, в совершенствование которых вкладываются огромные средства. Создание дисперсионно-упрочненных, монокристаллических, эвтектических сплавов, а также сплавов, легированных рением [1], открыло широкие перспективы для совершенствования двигателей. Например, благодаря сплавам с рением стало возможным повысить температуру газа перед турбиной до 2000...2200 К.

Успешно проходят исследования альтернативных сплавов, в частности на основе интерметаллидов, из которых наиболее перспективным считается сплав γ -TiAl [2].

Однако вопросы получения неразъемных соединений сплавов при изготовлении деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, а также ремонта до настоящего времени пока еще не решены. Объясняется это тем, что сварка для соединения данных материалов не пригодна, а высокотемпературная пайка основывается на старых, хотя и продуктивных в прошлом идеях, которые уже не отвечают требованиям сегодняшнего дня.

Большинство исследователей используют для пайки высоколегированных сплавов никелевые припои, в которых в качестве депрессантов выступают кремний и бор. По нашему мнению, более перспективными являются припои на основе никеля, в которых использованы такие депрессанты, как титан, цирконий, гафний, ниобий и др., что и обосновывается в настоящей работе. Ранее проведенным исследованиям этих сплавов посвящен ряд работ ИЭС им. Е. О. Патона и Института металлофизики (ИМФ) им. Г. В. Курдюмова [3–5].

Рассмотрим особенности этих сплавов на примере системы Ni-Cr-Zr. На рис. 1 представлены проекции поверхностей солидуса и ликвидуса в участке диаграммы состояния Ni-Cr-Zr, соответствующей сплавам с высоким содержанием никеля; отдельно вынесены проекции точек микротвердости эвтектик (HV , МПа). Диаграмма состояния построена на основе результатов, полученных при исследовании литых сплавов методами металлографического, рентгеноструктурного и дифференциально-термического анализов, и отражает фазовый состав сплавов с различной массовой долей

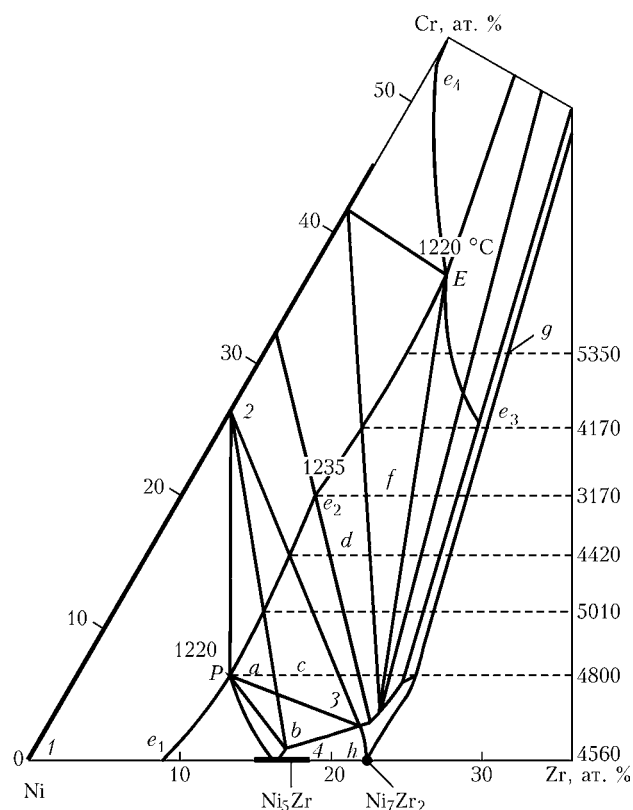


Рис. 1. Проекция поверхностей солидуса и ликвидуса никелевого угла диаграммы состояния системы Ni-Cr-Ni₃Zr₂ (структурные составляющие: *a* – $L + \gamma + \text{Ni}_3\text{Zr}$; *b* – $L + \text{Ni}_3\text{Zr} + \text{Ni}_7\text{Zr}_2$; *c* – $\gamma + \text{ZrNi}_3\text{Ni}_7\text{Zr}_2$; *d* – $\gamma + \text{Ni}_7\text{Zr}_2$; *f* – $\alpha + \gamma + \text{Ni}_7\text{Zr}_2$; *g* – $\alpha + \text{Ni}_7\text{Zr}_2$; *h* – $\text{Ni}_3\text{Zr} + \text{Ni}_7\text{Zr}_2$; остальные обозначения см. в тексте)

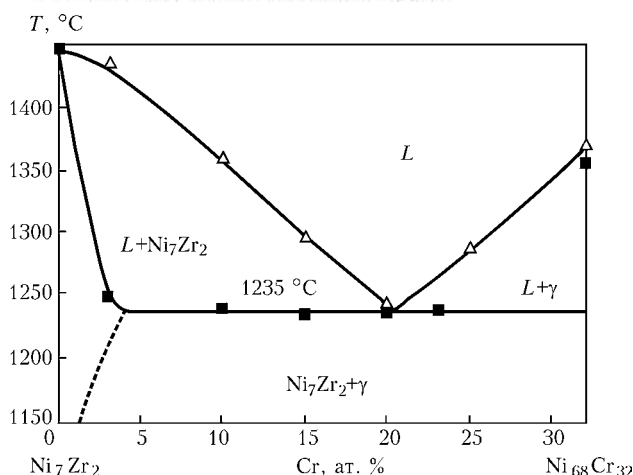


Рис. 2. Квазидвойной разрез $\text{Ni}_7\text{Zr}_2\text{--Ni}_{68}\text{Cr}_{32}$: Δ , $\blacksquare$ — температура соответственно ликвидуса и солидуса

хрома и циркония. Как следует из рис. 1, на диаграмме состояния системы Ni--Cr--Zr в области, ограниченной треугольником $\text{Ni--Cr--Ni}_7\text{Zr}_2$, в пределах двухфазных областей $\gamma\text{-Ni+Ni}_7\text{Zr}_2$ и $\alpha\text{-Cr+Ni}_7\text{Zr}_2$ существует два квазидвойных разреза, которые и определяют характер фазовых равновесий на этом участке диаграммы. На концентрационном треугольнике их можно представить в виде лучей, проходящих через точки с координатами $\text{Ni}_{68}\text{Cr}_{32}\text{--Ni}_{76}\text{Zr}_{24}$ и $\text{Cr--Ni}_{67,5}\text{Zr}_{23,5}$. Оба разреза эвтектического типа. Эвтектика между $\gamma\text{-Ni}$ и Ni_7Zr_2 содержит около 8,8 ат. % Zr и 20 ат. % Cr и имеет температуру плавления 1235 °C (рис. 1, 2).

На диаграмме состояния существует область четырехфазного перитектического равновесия, которая на рис. 1 ограничена точками 2–3–4–P. При

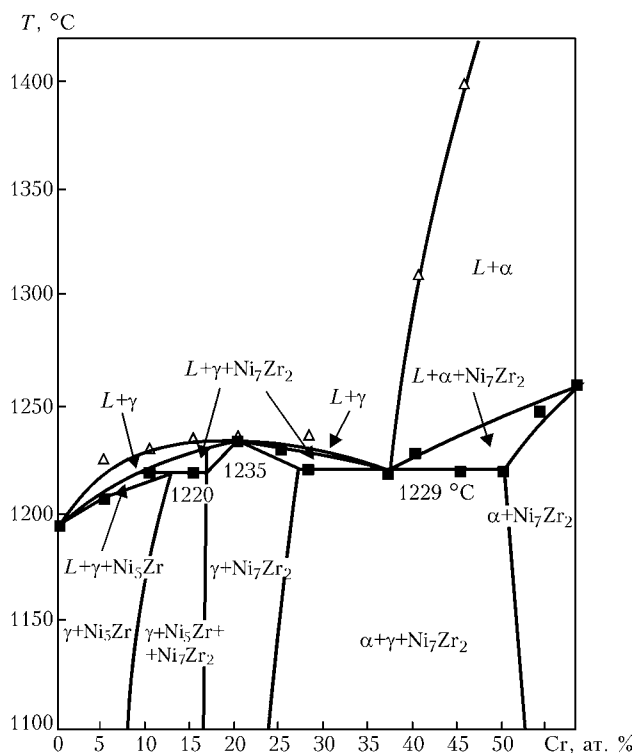


Рис. 3. Политермический разрез диаграммы состояния системы Ni--Cr--Zr вдоль изоконцентрации 8,8 ат. % Zr (см. обозначения рис. 2)

этом у сплавов, состав которых попадает в область, ограниченную точками 2–3–4, кристаллизация в равновесных условиях завершается реакцией $\text{Ni}_7\text{Zr}_2 + L = \gamma\text{-Ni} + \text{Ni}_5\text{Zr}$ при температуре 1220 °C. Эти сплавы трехфазные и состоят из $\gamma\text{-Ni}$, Ni_5Zr и Ni_7Zr_2 . Сплавы в области диаграммы состояния, ограниченной точками 1–2–4, должны быть двухфазными и состоять из $\gamma\text{-Ni}$ и Ni_5Zr .

Наибольший интерес, с точки зрения разработки припоев, представляют эвтектические сплавы, содержащие 8,8 ат. % Zr. На рис. 3 показано изменение температур плавления и структурного состава таких сплавов в зависимости от содержания хрома. Важно отметить, что легирование бинарной эвтектики $\text{Ni+Ni}_5\text{Zr}$ хромом приводит к незначительному повышению температуры солидуса, но при этом микротвердость эвтектической структурной составляющей в сплавах с постоянным (8,8 ат. %) содержанием циркония существенно меняется. Так, в пределах двойной области $\gamma\text{-Ni} + \text{Ni}_5\text{Zr}$ увеличение массовой доли хрома в сплавах приводит к повышению микротвердости эвтектики за счет упрочнения твердого раствора $\gamma\text{-Ni}$. При появлении в структуре сплавов интерметаллида Ni_7Zr_2 , микротвердость которого значительно ниже, чем $\gamma\text{-Ni}$, с массовой долей хрома более 25 %, и Ni_5Zr , микротвердость эвтектики начинает понижаться, достигая минимума на разрезе $\text{Ni}_{68}\text{Cr}_{32}\text{--Ni}_7\text{Zr}_{24}$. Дальнейшее повышение массовой доли хрома приводит к появлению в сплавах тройной эвтектики (точка E на рис. 1), содержащей упрочненный $\alpha'\text{-Cr}$ с высокой массовой долей никеля, а после пересечения линии $e_4\text{--}e_3$ — к образованию первичных кристаллов $\alpha'\text{-Cr}$, наличие которых в структуре сплавов способствует увеличению твердости.

Далее будут рассмотрены структура и химическая неоднородность паяных швов, полученных с применением припоев на базе системы Ni--Cr--Zr в условиях дугового нагрева. Как известно, одно из главных отличий пайки от сварки состоит в том, что в последней присадочный металл, как правило, близок по структуре и свойствам к основному. Однако при сварке высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием γ -фазы (например, ЖС6У, ЖС32, ЧС70, ЧС88, IN 738 и др.) использовать присадку аналогичного состава не удастся. В этом случае применяют сплавы (например, сплав 533) со значительно меньшим содержанием, в частности, алюминия и титана, а значит, и γ -фазы. Этот сплав заметно уступает по жаропрочности основному металлу.

Рассматриваемые припои являются эвтектическими сплавами, поэтому при использовании их в качестве присадочного материала при дуговой пайке металл швов содержит значительную объемную долю эвтектики (рис. 4). Естественно, в этом случае невозможно получить высокие показатели жаропрочности. Радикально изменить структуру шва путем применения диффузионного отжига нереально в приемлемое для практики время из-за незначительной степени растворимости циркония в никеле.



Для устранения этого недостатка целесообразно идти по пути создания композиционных припоев, представляющих собой механическую смесь порошков легко- (эвтектический сплав) и тугоплавкой (жаропрочный сплав) составляющих. Количество тугоплавкой составляющей может колебаться в широких (от 20 до 70 %) пределах. Основная цель при разработке композиционного припоя — сохранить низкую температуру смачивания основного металла и радикально изменить состав металла паяного шва, приблизив его к основному, т. е. необходимо стремиться достичь максимально возможное содержание тугоплавкой составляющей в припое. Естественно, в этом случае после расплавления припоя под воздействием дугового нагрева в шве может быть получен жаропрочный сплав.

В работе [6] исследована структура металла зоны соединения, полученного при использовании сплавов этой системы в качестве припоев при дуговой пайке в зависимости от тепловложения и вида применяемого припоя (литой сплав, композиционный). Установлено, что при использовании оптимального тепловложения и композиционного припоя формируется мелкодисперсная структура металла швов, при этом трещины отсутствуют (рис. 5, а).

Рассмотрим подробнее структуру и химическую неоднородность наплавленного металла (рис. 5, б). Микрорентгеноспектральный анализ показал, что металл шва представляет собой сплав, который по своему составу может быть отнесен к жаропрочному (табл. 1). При этом следует особо обратить внимание на высокую массовую долю алю-

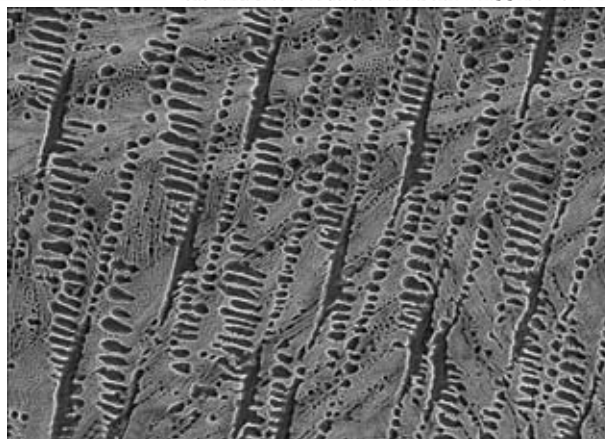


Рис. 4. Микроструктура металла шва, полученного дуговой пайкой припоем, системы Ni-Cr-Zr (X550)

миния (5,5 %) и титана (2,9 %). Содержание циркония составляет 1,9 мас. %. В металле шва преобладает твердый раствор переменной концентрации (дендриты и металл в междендритных пространствах) с низкой (примерно 0,2 мас. %) массовой долей циркония. По границам зерен расположены мелкие выделения карбидов.

После отжига при температуре 1125 °С в течение 4 ч структура металла шва изменилась кардинально (рис. 5, в), а химический состав незначительно.

При дуговой пайке композиционным припоем с большим количеством тугоплавкой составляющей четко определить границу соединения оказалось затруднительно, поскольку травимость наплавленного и основного металла практически одинакова. После термообработки (при температуре 1125 °С в течение 4 ч) на отдельных участках шва

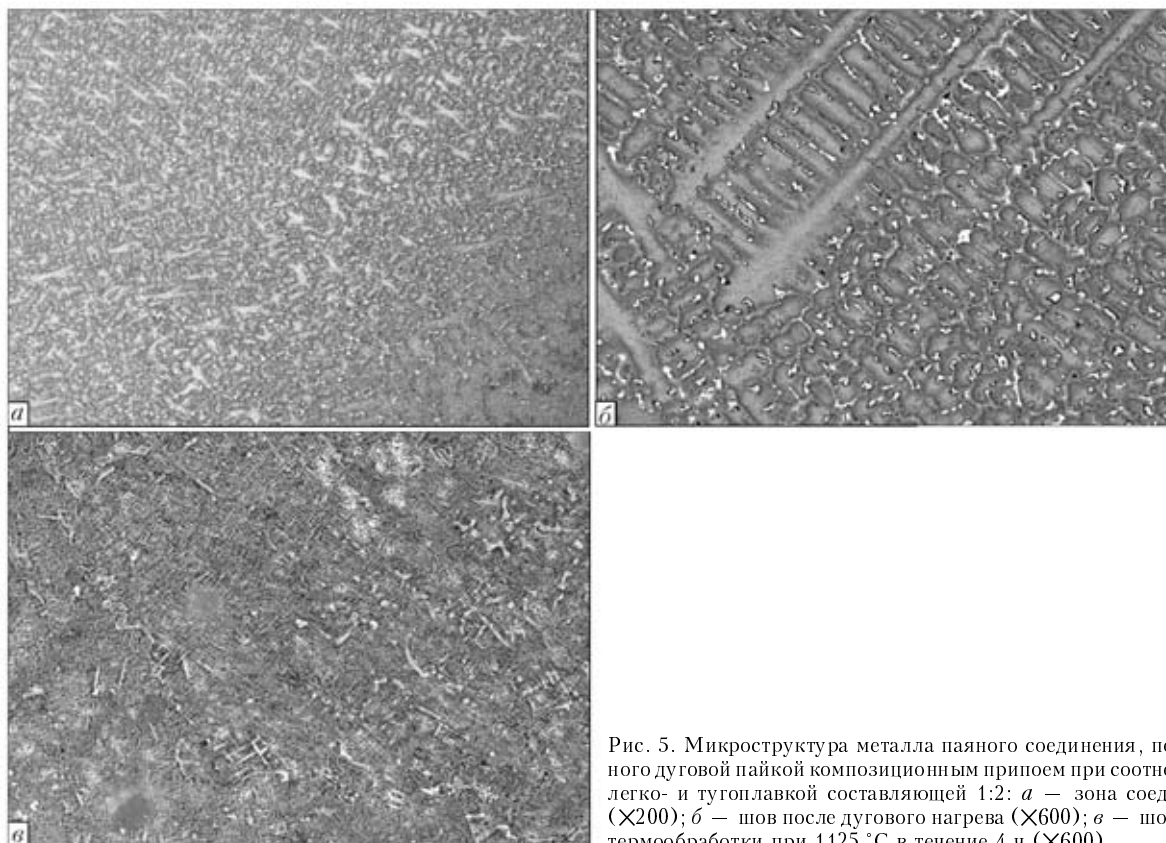


Рис. 5. Микроструктура металла паяного соединения, полученного дуговой пайкой композиционным припоем при соотношении легко- и тугоплавкой составляющей 1:2: а — зона соединения (X200); б — шов после дугового нагрева (X600); в — шов после термообработки при 1125 °С в течение 4 ч (X600)



Таблица 1. Химическая микронеоднородность наплавленного металла швов, полученного с использованием дугового нагрева и композиционного припоя

Соотношение легко- и тугоплавкой составляющей	Исследуемый участок	Массовая доля элементов, %							
		Co	Zr	Cr	Ti	Al	W	Mo	Nb
1:2	Общая поверхность металла	8,4	1,9	4,8	2,9	5,5	8,2	1,5	1,0
	Дендрит	9,9	0,2	5,9	2,3	4,9	9,6	0,8	1,0
	Металл в междендритном пространстве	7,8	0,2	4,3	4,0	5,9	7,0	0,2	1,4
1:3	Общая поверхность металла	7,9	0,7	3,6	3,1	6,0	9,2	0,8	1,3

Примечание. Никель — основа.

формируется довольно однородная структура металла. Это скорее всего эвтектика γ - γ' -фазы в пределах зерен, которые иногда окаймлены второй фазой (рис. 6).

Естественно, состав структуры металла швов может быть радикально изменен за счет термообработки, в результате которой образуется мелкодисперсная γ' -фаза.

Средняя массовая доля циркония в наплавленном металле составляет около 0,7 %; после термообработки цирконий практически не обнаруживается. Высокое содержание алюминия и титана сохраняется как после дуговой пайки, так и после термообработки.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлено, что при использовании композиционного припоя и дугового нагрева в шве можно получить жаропрочный сплав с высоким содержанием алюминия и титана, а значит, за счет термообработки — значительную объемную долю γ' -фазы. Состав композиционного припоя можно легко изменять в зависимости от состава паяемого металла.

Рассмотрим теперь результаты исследования паяемости интерметаллидного сплава γ -TiAl. Исходя из характеристик жаропрочности (до 700... 750 °C) этот сплав может конкурировать с высоколегированными никелевыми сплавами, заметно выигрывая при этом по плотности (3,5 г/см³ вместо 8,9 г/см³ у никеля). Это позволит уменьшить массу газотурбинного двигателя до 30 %. Сплав γ -TiAl имеет высокую прочность при комнатной температуре (650... 700 МПа) и при 700 °C (320... 350 МПа). Од-

нако его низкая (на уровне 0,2... 0,5 %) пластичность при обычной температуре, обусловленная упорядоченной структурой γ -TiAl, несколько сдерживает применение интерметаллидных сплавов и усложняет их технологическую обработку. Тем не менее, их можно использовать во многих узлах горячего тракта газотурбинных двигателей, если будут разработаны способы их соединения и соответствующие припои.

Получение паяных соединений сплава γ -TiAl и выбор состава припоев затруднены в связи с тем, что диапазон изменения содержания легирующих элементов, при котором не происходит ухудшения механических свойств или служебных характеристик основного материала, весьма узок. При этом скорость диффузии многих компонентов припоев может существенно замедляться за счет образования интерметаллидных фаз с алюминием. Так, при получении соединений из интерметаллидного сплава XD (Ti-45Al-2Nb-2Mn-0,8TiB₂, об. %) с помощью диффузионной пайки при температуре 1000... 1100 °C и припоев систем Ti-Cu-Ni, Cu-Ni/Ti/Cu-Ni в металле швов наблюдаются интерметаллидные включения [7]. Их можно устранить последующей термообработкой (при 1310 °C в течение 30 мин). Однако при термообработке на таком режиме можно ожидать значительный рост размера зерна сплава. Перспективным является трехслойный припой Al-Ti-Al. Желаемая структура металла шва может быть получена с помощью подбора толщины титановой и алюминиевой фольг. В работе [7] утверждается, что интерметаллидный сплав γ -TiAl не может быть спаян при использовании фольг из серебра, алюминия или сплава Cu-Ni.

В качестве припоя используют также медную фольгу толщиной 5 и 50 мкм [8]. При этом отмечено преимущество меди как припоя: приемлемая температура плавления, отсутствие особо нежелательных интерметаллидов Ni₃AlTi, которые образуются в присутствии никеля. Наилучшие результаты получены при использовании фольги толщиной 5 мкм и пайке на следующем режиме: выдержке при температуре 1150 °C в течение 10 мин с последующей термообработкой (1350 °C, 1 ч). Прочность (на срез) паяных соединений при температуре 20 °C (без снятия галтельных участков) равна 250 МПа. При снятии галтельных участков и дополнительной полировке образцов она повышается до уровня основного металла и составляет 350 МПа. Следует обратить внимание на низкую

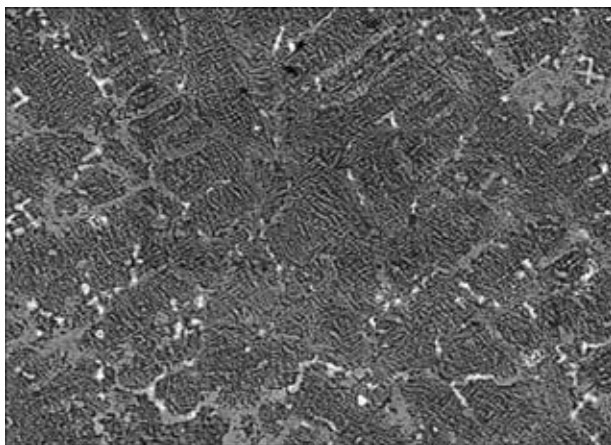


Рис. 6. Микроструктура металла шва, полученного дуговой пайкой композиционным припоем с большим количеством тугоплавкой составляющей, после термообработки (X600)



прочность основного металла, что связано, по-видимому, с влиянием высокотемпературной термической обработки.

Перспективны в плане создания припоев сплавы систем Ti–Zr–Mn и Ti–Zr–Fe, поскольку в бинарных системах Ti–Mn, Ti–Fe, Zr–Mn и Zr–Fe между твердыми растворами $\beta(\text{Ti})$ и $\beta(\text{Zr})$, с одной стороны, и богатыми титаном и цирконием интерметаллидами, с другой стороны, расположены относительно легкоплавкие эвтектики, имеющие температуру плавления соответственно 1180, 1085, 1135 и 928 °C [9]. На основании изоструктурности соединений TiMn_2 и ZrMn_2 , наличия в системе Ti–Zr непрерывных рядов твердых растворов, а также диаграмм плавкости с температурным минимумом можно ожидать появления в тройных сплавах системы Ti–Zr–Mn области составов с температурой солидуса более низкой, чем температура эвтектик в ограничивающих бинарных системах. Результаты фундаментальных исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона и ИМФ им. Г. В. Курдюмова, подтвердили существование двойной области $\beta(\text{Ti, Zr}) + (\text{Ti, Zr})\text{Mn}_2$ в системе Ti–Zr–Mn. На рис. 7 приведен политермический разрез, проходящий через точки состава бинарных эвтектик в ограничивающих системах, который отражает характер изменения температуры солидуса в тройных сплавах.

В системе Ti–Zr–Fe изменение температуры начала плавления эвтектики в сплавах по разрезу $\text{Ti}_{70,5}\text{Fe}_{29,5}\text{–Zr}_{76}\text{Fe}_{24}$ не является столь простым, как в системе Ti–Zr–Mn. Это связано со сложным характером фазовых равновесий, что приводит к изменению природы интерметаллидной составляющей в эвтектике.

На базе проведенных исследований выбраны перспективные составы сплавов систем Ti–Zr–Fe и Ti–Zr–Mn для использования в качестве припоев. Изучены их морфологические особенности, выполнена вакуумная пайка интерметаллидного сплава $\gamma\text{-TiAl}$ марки 47XD, полученного способом порошковой металлургии. Для проведения сравнительных исследований использовали промышленные припои ВПр-16, мас. % (Ti–24Cu–13Zr–9Ni) и ВПр-28 (Ti–23Zr–16Cu–15Ni) [10], а также опытные сплавы систем Ti–Zr–Fe и Ti–Zr–Mn.

Для исследования микроструктуры металла паяных швов применяли растровый электронный микроскоп фирмы «Джеол» (Япония), снабженный системой микроанализаторов.

Механические испытания паяных стыковых образцов из сплава $\gamma\text{-TiAl}$ на кратковременную проч-

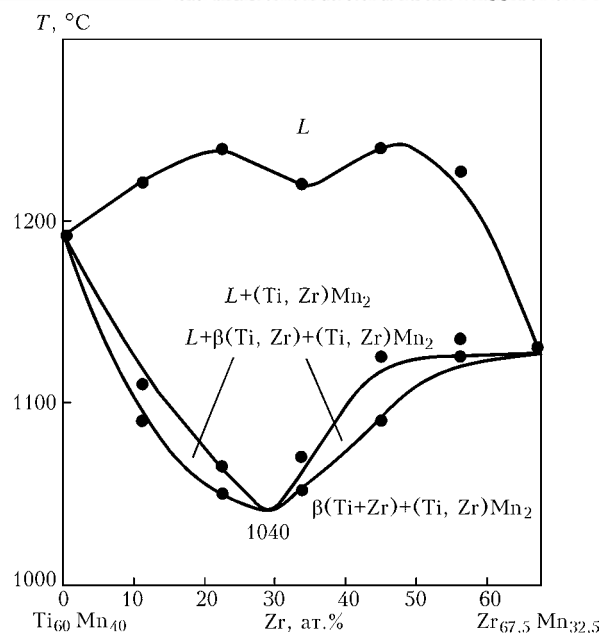


Рис. 7. Метастабильный фазовый состав сплавов на разрезе $\text{Ti}_{60}\text{Mn}_{40}\text{–Zr}_{67,5}\text{Mn}_{32,5}$, полученный при скорости охлаждения более 0,5 K/с

ность при температурах 20 и 700 °C проводили на установке ФР 100/1. Испытания на длительную прочность (в соответствии с ГОСТ 3248–60 и ГОСТ 10145–81) выполняли на установке АИМА 5-2 при постоянных температуре и нагрузке.

Металлографические исследования паяных соединений сплава $\gamma\text{-TiAl}$ показали, что при использовании промышленных припоев (ВПр-16 и ВПр-28) в паяных швах образуются дефекты — непропаи и трещины. Металл в центральной части паяного шва (шириной около 200 мм) характеризуется явно выраженной химической неоднородностью: в виде непрерывной цепочки кристаллизуется эвтектическая составляющая.

При пайке опытными припоями участки эвтектики в металле шва встречаются реже, есть участки, где металл паяного шва имеет lamellarную структуру, близкую к основному металлу (рис. 8). Следует отметить, что для получения хороших результатов важен не только состав припоя, но и режимы пайки.

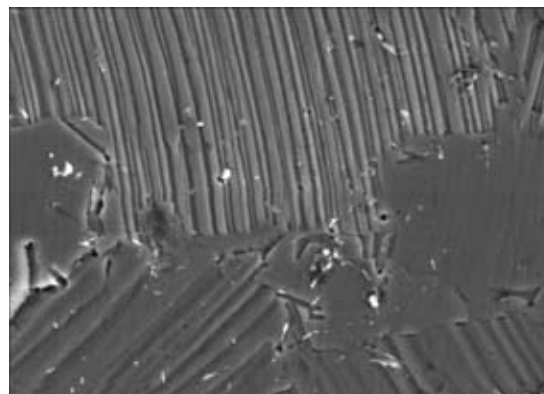


Рис. 8. Микроструктура металла паяного соединения сплава $\gamma\text{-TiAl}$, полученного с использованием опытного припоя, системы Ti–Zr–Mn (X1500)

Таблица 2. Свойства паяных соединений интерметаллидного сплава $\gamma\text{-TiAl}$

№ припоя	Система, марка сплава	Прочность, МПа, при температуре		Время до разрушения образцов при 700 °C, ч, при нагрузке	
		20 °C	700 °C	140 МПа	200 МПа
1	Ti–Zr–Fe	651	284	483	499
2	Ti–Zr–Mn	693	316	500	300
3	ВПр-16	574	300	—	—
4	ВПр-28	468	—	—	—



Результаты прочностных испытаний показали (табл. 2), что паяные соединения сплава γ -TiAl, выполненные опытными припоями № 1 и 2, имеют максимальную кратковременную прочность при комнатной и повышенной температуре, близкую к прочности паемого материала. При испытаниях на длительную прочность образцы паяных соединений не разрушались как при заданной (140 МПа), так и повышенной (200 МПа) нагрузке (табл. 2).

Таким образом, при пайке сплава γ -TiAl с использованием разработанных припоев удалось получить соединения по структуре и свойствам, близкие к основному металлу. В настоящее время припой можно применять для пайки перспективных конструкций различного назначения. Актуальной остается задача разработки технологии производства новых припоев в необходимых формах, в частности в виде быстрозакаленных фольг, экструдированных прутков и др.

1. Каблов Е. ВИАМ — сердце авиационной материаловедческой науки // Вест. воздуш. флота. — 2003. — № 4. — С. 6.
2. Clemens H. Intermetallic γ -TiAl based alloy sheet materials. Processing and mechanical properties // Zeitschrift für Metallkunde. — 1995. — 86, № 12. — P. 814–822.

Fundamental studies of alloys of Ni-Cr-Zr and Ti-Zr-Mn systems relating to content of elements, promising from the point of view of development of brazing alloys, were carried out. Data about temperature of melting alloys, their phase composition and morphological peculiarities are obtained. Brazing alloys for brazing high-alloy heat-resistant nickel alloys and intermetallic alloy γ -TiAl were developed on the basis of the results obtained. Structure and some properties of brazed joints were examined.

3. Khorunov V. F., Ukader E. M. Principles for development of eutectic filler metals for heat resistant nickel alloy brazing // Proc. of the Intern. conf. «Joining/Welding 2000», Hague, Netherlands, 1–2 July, 1991. — Oxford: Pergamon press, 1991. — P. 357–369.
4. Khorunov V. F., Ivanchenko V. G., Kvasnitskiy V. V. Investigation of Ni-Cr-Zr and Ni-Cr-Hf alloys // Intern. conf. «Brazing, high temperature brazing and diffusion welding», Aachen, Germany, May, 1998. — Düsseldorf, 1988. — P. 59–61.
5. Brazing filler metal containing Zr and Hf as depressants // V. Khorunov, S. Maksymova, S. Samokhin, V. Ivanchenko // Proc. of the Third intern. conf. «High temperature capillarity» (HTC-2000), Kurashiki, Japan, 19–22 Nov., 2000. — Osaka, 2001. — P. 419–424.
6. Хорунгов В. Ф., Максимова С. В., Зволлинский И. В. Структура паяных соединений высоколегированных никелевых сплавов, полученных с использованием дугового нагрева // Автомат. сварка. — 2003. — № 7. — С. 19–22.
7. Diffusion brazing of a TiAl alloy // Q. Xu, M. C. Chaturvedi, N. L. Richards, N. Goel // Intern. brazing and soldering conf., Albuquerque, New Mexico, 2–5 Apr., 2000. — Albuquerque, New Mexico, 2000. — P. 57–64.
8. Diffusion brazing of titanium aluminide, wettability, microstructural development and mechanical properties // W. F. Gale, X. Wen, Y. Shen et al. // Ibid. — P. 42–49.
9. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1999. — Т. 3. Кн. 1. — 880 с.
10. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. — М.: Машиностроение, 2003. — 480 с.

Поступила в редакцию 15.06.2004

Научно-производственный центр «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Сплавы на основе титана благодаря высокой удельной прочности и другим уникальным свойствам нашли широкое применение в аэрокосмической технике, самолетостроении, судостроении, химическом машиностроении, энергетике и других областях промышленности. Основным сырьем для изготовления титановых сплавов является губчатый титан, который производится на Запорожском титано-магниеком комбинате из ильменитовых руд. Украина занимает третье место в мире по запасам этих руд, причем самого высокого качества.

Для разработок сплавов на основе титана, оборудования и технологий их получения из губчатого титана в 1996 г. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины был создан Научно-производственный центр «Титан». Производство слитков осуществляется методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) на отечественном оборудовании производительностью 3000 т в год. При этом впервые в мире:

- ✓ способ ЭЛПЕ использован для получения высоколегированных сплавов титана;
- ✓ создана и внедрена в производство технология выплавки слитков из недробленных блоков губчатого титана;
- ✓ освоена выплавка полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб;
- ✓ созданы оборудование и технология оплавления боковой поверхности слитков, успешно применяемые вместо их механической обработки.

В настоящее время Научно-производственным центром «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона установлены кооперационные связи со специализированными предприятиями Украины, что позволяет производить различный сортамент полуфабрикатов из титана (поковки, прутки, трубы) как для нужд промышленности Украины, так и на экспорт.

НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины
03028, ул. Ракетная, 26, Киев, Украина
Тел.: (38044) 264-9543
Факс: (38044) 264-1096



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ РЕЛЬСОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук, **Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Ю. В. ШВЕЦ**, **А. В. ДИДКОВСКИЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Использован расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в зоне сварных стыков. Основные данные получены путем математического моделирования процесса формирования упругопластических деформаций по мере остывания сваренных деталей, вплоть до остаточного состояния.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, пульсирующее оплавление, сварное соединение, остаточные напряжения, микроструктура, математическая модель

При изготовлении бесстыкового железнодорожного пути для скоростных магистралей широко применяется сварка, перед которой в настоящее время ставятся новые задачи, поскольку длина сварных плетей возрастает с 400...800 м до длины цельно-сварной плети, достигающей несколько километров [1]. Использование плетей такой длины повышает вероятность возникновения в них дополнительных продольных сил, что вызвано внешними силовыми воздействиями, например, подвижной нагрузкой при изменении режима движения поезда. Это в свою очередь ужесточает требования к эксплуатационной стойкости сварных стыков.

В бесстыковых путях широко используют высокопрочные рельсы, в частности из электростали, имеющей повышенное содержание марганца, ванадия, азота (табл. 1). По сравнению с рельсами производства прошлых лет они имеют более высокую износостойкость и прочность (табл. 2). Чаще всего рельсы при изготовлении подвергаются объемной закалке, а затем при сварке участки зоны термического влияния (ЗТВ) разупрочняются. В связи с этим требуется дополнительная термическая обработка, которая во многих случаях трудно осуществима и к тому же не обеспечивает восстановления необходимых свойств металла.

Разработка способов снижения тепловложения при сварке в целях сокращения протяженности участков, подвергшихся высокотемпературному нагреву, является перспективным направлением в совершенствовании технологии сварки рельсов из высокопрочных сталей. Однако при этом необходимо учитывать, что рассматриваемые рельсовые стали весьма чувствительны к закалке и приме-

нение высококонцентрированного нагрева может привести к образованию в металле ЗТВ опасных закалочных структур и возникновению значительных остаточных напряжений в сварном шве.

Эксплуатационная стойкость сварных стыков зависит от уровня остаточных напряжений. В условиях циклического нагружения остаточные напряжения изменяют значения среднего напряжения цикла внешней нагрузки, что может способствовать зарождению усталостной трещины или, наоборот, предотвращению ее возникновения. С учетом того, что большинство повреждений сварных стыков в пути носит усталостный характер, исследования остаточного напряженного состояния сварных рельсов представляют не только теоретический, но и практический интерес [3].

Наиболее широко во всем мире для сварки рельсов используется контактная стыковая сварка оплавлением. В ИЭС им. Е. О. Патона в последние годы разработан новый технологический процесс — пульсирующее оплавление, — который значительно расширит технологические возможности этого способа сварки за счет сокращения припуска на сварку и возможности получать при нагреве тепловые поля с различным градиентом температуры. Это позволяет сваривать рельсы различных типов как поверхностно-закаленные, так и объемно-закаленные [4].

В ходе ранее проведенных исследований установлено, что при сварке таких рельсов следует стремиться к ограничению энергозатрат во избежание разупрочнения в зоне сварки. Однако применение режимов сварки с большим градиентом температурного поля увеличивает вероятность появления дефектов в плоскости соединения. Кроме того, при использовании высококонцентрированного нагрева можно ожидать повышения уровня

Таблица 1. Химический состав рельсовой стали, мас. % [2]

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Al	V	N
М76	0,76	0,99	0,30	0,011	0,0175	0,013	—	—
Э76	0,82	1,11	0,49	0,01	0,006	0,011	0,11	0,014

Таблица 2. Механические свойства рельсовой стали [2]

Марка стали	Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU , МДж/м ²
М76	1281	965	10	32,5	0,42
Э76	1350	1010	13	44,0	0,44

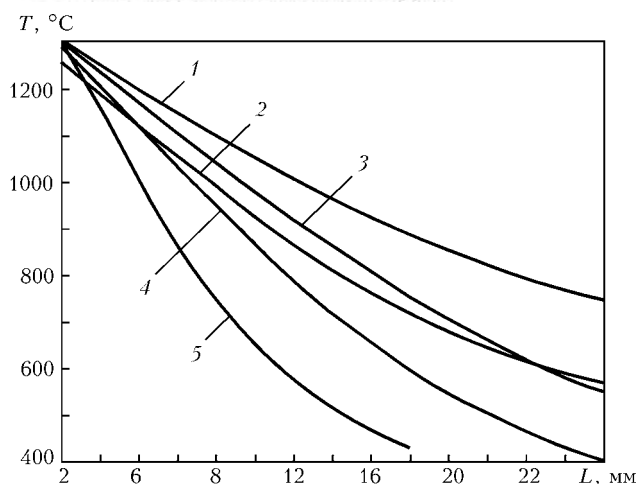


Рис. 1. Распределение температуры в ЗТВ сварного соединения перед осадкой при сварке на различных режимах: 1 — предварительный подогрев ($t_{\text{св}} = 200 \dots 250$ с); 2 — непрерывное оплавление с программным понижением напряжения ($t_{\text{св}} = 180 \dots 220$ с); 3–5 — пульсирующее оплавление (соответственно $t_{\text{св}} = 110 \dots 120$; $70 \dots 80$; $30 \dots 40$ с)

остаточных напряжений в сварных соединениях и соответственно снижения их усталостной прочности.

Цель настоящей работы — оценить влияние различных тепловых режимов при сварке оплавлением на остаточные напряжения и возможные структурные изменения в ЗТВ сварных соединений рельсовой стали М76.

В работе использован расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в зоне сварных стыков, при котором основные данные получены путем математического моделирования процесса формирования упругопластических деформаций по мере остывания сварных соединений вплоть до комнатной температуры.

В основу расчета приняты экспериментальные данные о распределении температуры в ЗТВ сварного соединения при контактной сварке оплавлением.

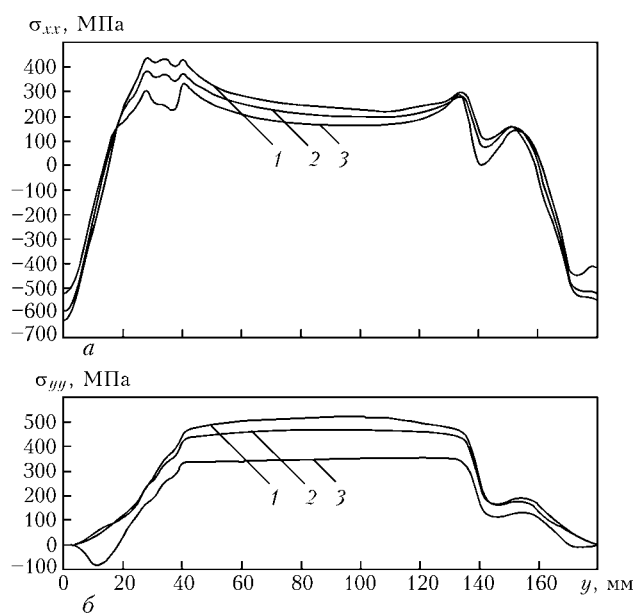


Рис. 2. Расчетные зависимости продольных σ_{xx} (а) и поперечных σ_{yy} (б) остаточных напряжений, полученные для вариантов нагрева 2 (кривая 1), 4 (кривая 2) и 5 (кривая 3)

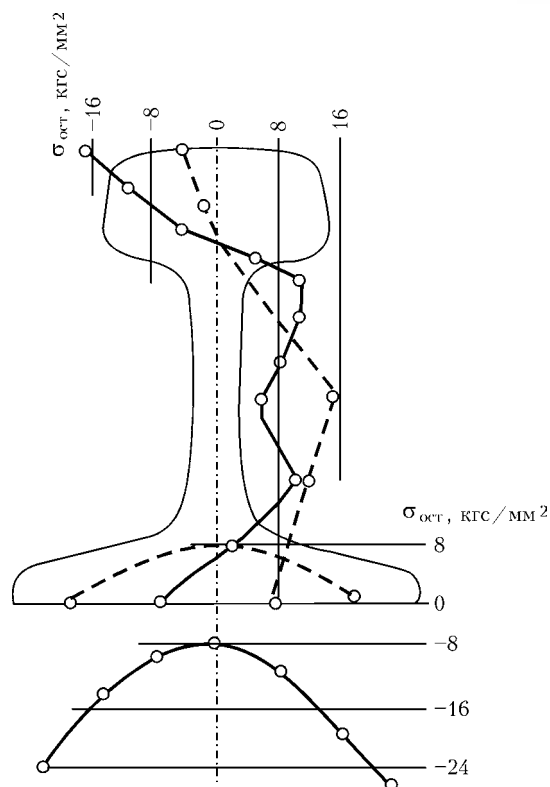


Рис. 3. Результаты замеров продольных (сплошные линии) и поперечных (штриховые линии) остаточных напряжений в сварном стыке рельсов из стали Р65 (вариант 2) [3]

Кривые распределения температуры на рис. 1 соответствуют различным вариантам режимов сварки рельсов непрерывным и пульсирующим оплавлением, при которых обеспечивается качественное формирование соединений.

При всех приведенных режимах сварки получены соединения без дефектов. При этом ширина зоны структурных превращений (температура выше 700 °С) в сварных соединениях, полученных на «мягком» режиме сварки (табл. 3, вариант 2) в 2 раза больше, чем на «жестких» (варианты 4 и 5). Соответственно отличались структура металла ЗТВ и прочностные свойства.

Расчет проводили для трех вариантов (2, 4 и 5) режимов с различными температурными полями (соответственно кривые 2, 4, 5 на рис. 1), которые принимали за начальное распределение температуры. С помощью апробированных средств теории теплопроводности прослеживали процесс охлаждения. Указанную идею использовали уже неоднократно в ряде работ [5 и др.]. Она позволяет существенно упростить решение управления теплопроводности за счет исключения из расчета процесса нагрева деталей при контактной сварке оплавлением.

Для расчета температуры использовали алгоритм численного решения трехмерного уравнения теплопроводности при начальных и граничных условиях, соответствующих условиям охлаждения образцов. Расчет проводили с помощью компьютерной программы 3D, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона.

Для расчета напряженного состояния использовали алгоритм численного решения задачи не-

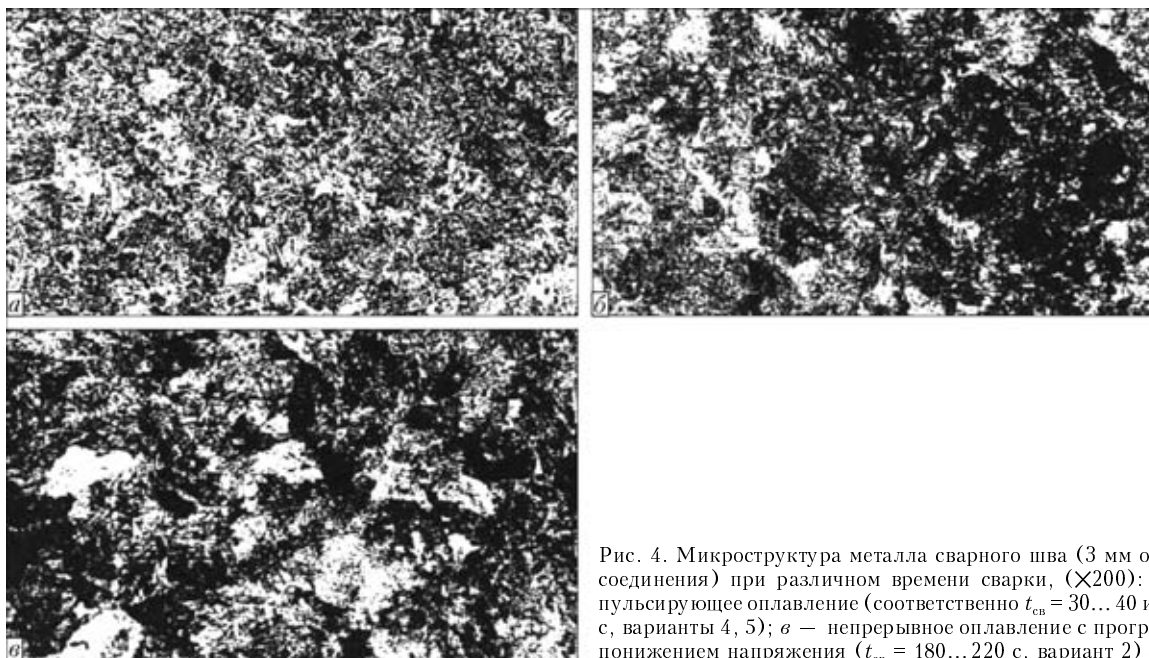


Рис. 4. Микроструктура металла сварного шва (3 мм от линии соединения) при различном времени сварки, ($\times 200$): а, б — пульсирующее оплавление (соответственно $t_{\text{св}} = 30 \dots 40$ и $70 \dots 80$ с, варианты 4, 5); в — непрерывное оплавление с программным понижением напряжения ($t_{\text{св}} = 180 \dots 220$ с, вариант 2)

изотермического пластического течения с условием текучести Мизеса [6], а для описания кинетики микроструктурных изменений в ЗТВ сварных соединений стали М76 — характеристики диаграммы анизотропического расчета аустенита для стали с 0,77 % С [7]. Результаты расчета продольных и поперечных остаточных напряжений представлены на рис. 2.

Достоверность полученных данных оценена по результатам экспериментального измерения продольных и поперечных остаточных напряжений в сварных стыках рельсов из стали Р65, выполненных на режиме, соответствующем варианту 4 (рис. 2, кривая 2). На рис. 3 представлены результаты экспериментальных замеров продольных и поперечных остаточных напряжений, которые проводили способом вырезки темплетов по методике, описанной в работе [8].

Сравнив полученные расчетные данные (см. рис. 2) с результатами замеров остаточных напряжений (рис. 3), можно сделать вывод, что при-

нятая модель дает достоверные результаты. Различия в данных расчетных и замеров объясняются тем, что при проведении экспериментальных замеров имеет место усреднение значений напряжений из-за существенной протяженности базы замера.

Как видно из сравнения кривых на рис. 2, изменение нагрева стыков рельсов при сварке в достаточно широких пределах практически не влияет на значения остаточных напряжений, а также на их распределение в металле ЗТВ. Отсюда следует, что применение высококонцентрированного нагрева не должно оказывать отрицательного влияния на механические свойства сварных соединений.

Более сложно проявляется влияние нагрева на структуру металла в ЗТВ. Увеличение интенсивного нагрева приводит к сужению ЗТВ и сопровождается уменьшением размеров зерна в структуре металла приконтактной области. Преобладающей структурой при использовании режима сварки варианта 2 является перлит, в случае варианта 4 — сорбит, варианта 5 — сорбит с верхним бейнитом (рис. 4).

При этом уменьшение размеров зерна при испытаниях на статический изгиб приводит к по-

Таблица 3. Результаты испытаний на статический изгиб

Марка стали	Вариант режима сварки	Разрушающая нагрузка, кН	Стрела прогиба, мм
М76	2	$\frac{1900 \dots 2200}{2100}$	$\frac{38 \dots 55}{45}$
	4	$\frac{2000 \dots 2300}{2130}$	$\frac{43 \dots 60}{53}$
	5	$\frac{2250 \dots 2350}{2300}$	$\frac{41 \dots 63}{46}$
Э76	2	$\frac{1800 \dots 2300}{2040}$	$\frac{17 \dots 30}{20}$
	4	$\frac{2120 \dots 2500}{2180}$	$\frac{31 \dots 45}{35}$
	5	$\frac{2050 \dots 2500}{2350}$	$\frac{28 \dots 36}{32}$

Примечания. 1. Вариант 2 — непрерывное оплавление; варианты 4 и 5 — пульсирующие. 2. В числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние.

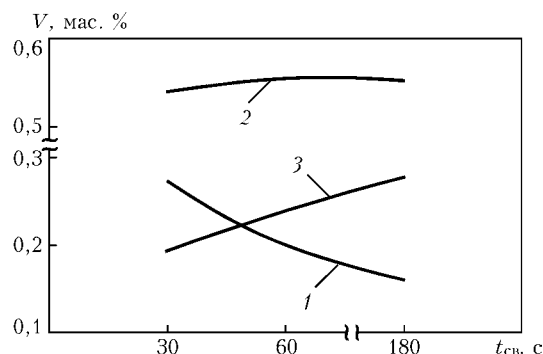


Рис. 5. Изменения массовой доли V мартенсита (1), бейнита (2) и ферритно-перлитной смеси (3) в микроструктуре металла ЗТВ стали М76 при различном времени сварки



вышению прочностных свойств (возрастает разрушающая нагрузка). Пластические свойства (стрела прогиба) при увеличении интенсивности нагрева сначала возрастают (вариант 4, табл. 3), а затем снижаются (вариант 5).

На рис. 5 приведены расчетные данные о микроструктурных изменениях в металле ЗТВ сварных соединений стали М76 при различных параметрах режима сварки.

Многолетний опыт эксплуатации сварных стыков, выполненных с использованием непрерывного оплавления с программным понижением напряжения (вариант 2), показал, что имеющийся уровень остаточных напряжений не оказывает существенного влияния на их прочностные свойства. При этом очаги мартенситных включений или вовсе не обнаруживаются, или имеют малую протяженность и от них не зависит несущая способность сварного стыка.

Как показали исследования, при сварке с использованием режимов пульсирующего оплавления, близких по тепловложению к варианту 4, не происходит повышение остаточных напряжений. Образовавшиеся в металле ЗТВ мартенситные структуры не приводят к снижению эксплуатационной стойкости сварных стыков.

Применение более интенсивных режимов пульсирующего оплавления, аналогичных варианту 5, может способствовать снижению пластических свойств сварного соединения из-за более высокого содержания мартенситной фазы, что устраняется последующей термической обработкой.

Выводы

1. Разработанная математическая модель позволяет получать достоверные результаты при расчете остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением.

2. Математическая модель микроструктурных изменений в металле ЗТВ дает возможность про-

водить сравнительную оценку влияния режимов сварки на структуру металла сварного шва.

3. При изменениях нагрева в интервалах температур, которые можно обеспечить при сварке непрерывным и пульсирующим оплавлением, распределение внутренних напряжений в зоне сварки, а также их значения изменяются незначительно. Поэтому применение «жестких» режимов сварки не приводит к повышению уровня остаточных напряжений.

4. При уменьшении нагрева массовая доля основной структуры шва — бейнита — не изменяется, а массовая доля мартенсита увеличивается. Поэтому при выборе режимов сварки необходимо учитывать совокупность влияния этих двух факторов на получение наиболее высоких показателей пластических свойств сварных соединений.

1. *Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстікової колії на залізницях України* / Е. І. Даніленко, М. І. Карпов, М. Д. Костюк та ін. — К.: Транспорт України, 2002. — 106 с.
2. *Производство рельсов из дисперсно-упрочненной стали* / В. И. Ворожичев, В. В. Павлов, Ю. Д. Девяткин и др. // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 2004. — № 2. — С. 47–51.
3. *Синадский Н. А., Шляпин В. Б.* Влияние холодной правки на качество сварных закаленных рельсов // Тр. ЦНИИ МПС. Вып. 556: Вестн. Всесоюз. НИИ ж.-д. трансп. «Сварка железнодорожных рельсов». — М., 1977. — С. 116–135.
4. *Контактная стыковая сварка рельсов. Опыт применения и перспективы совершенствования* / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, А. В. Бондарук, А. В. Дидковский // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 32–37.
5. *Напряжения при контактной сварке труб* / В. И. Махненко, С. И. Кучук-Яценко, В. М. Шекера и др. // Там же. — 1974. — № 4. — С. 33–50.
6. *Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых труб* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко и др. // Там же. — 2000. — № 5. — С. 3–8.
7. *Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels* / Ed. G. Vander Voort. — S. I.: ASM publ., 1991. — 570 p.
8. *Синадский Н. А., Шляпин В. Б.* Остаточное напряженное состояние сварных объемно-закаленных рельсов // Вестн. Всесоюз. НИИ ж.-д. трансп. — 1970. — № 8. — С. 38–41.

Calculation-experimental method of determination of residual stresses in the zone of welded joints was used. The basic data were obtained by mathematical modeling the process of formation of elastic-plastic deformations during cooling welded parts up to plastic condition.

Поступила в редакцию 17.05.2004



ВЫБОР МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **А. Е. КОРОТЫНСКИЙ**, **В. И. ЮМАТОВА**, кандидаты техн. наук,
М. И. СКОПЮК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены модели определения показателей качества сварного оборудования. Приведен оценочный расчет средневзвешенных показателей качества сварных трансформаторов, которые изготавливаются по единой технологической схеме в условиях серийного производства.

Ключевые слова: сварочное оборудование, технический уровень, квалиметрия, обобщенный коэффициент показателя качества, экспертная оценка, матрица, вектор, целевая функция

Задача повышения качества сварочного оборудования (СО) и его конкурентоспособности является одной из главных для фирм-производителей. В этой связи важное значение приобретает проблема разработки методов оценки технического уровня серийного СО. К сожалению, этому вопросу последние годы должного внимания не уделяется. Между тем, известен ряд работ [1–3] из области машиностроения, идеи которых можно адаптировать к оценке качества СО, но с учетом специфических особенностей его производства.

Для решения задачи оценки качества в квалиметрии [4] разработаны различные подходы, основанные на обобщенных показателях качества $Q_{об}$ СО, которые могут рассматриваться в двух аспектах: первый — сравнение $Q_{об}$ с такими же показателями, полученными для соответствующих изделий других фирм, т. е. определение технического уровня СО [5] среди аналогов и прототипов; второй — определение показателя качества по результатам измерений технических параметров образцов продукции серийного производства. Решение второй задачи актуально для производителей СО, работающих в соответствии с нормами ISO 9001, где регламентом предусмотрен непрерывный мониторинг качества выпускаемой продукции.

Анализ методов оценки обобщенного показателя качества изделий. Первые модели комплексной оценки качества строились как простое объединение оценок отдельных свойств изделия, без учета их весовости [6]. Это так называемое оценивание по среднему. Естественно, что эффективность таких средних оценок может удовлетворить пользователей в незначительной степени. Введение в модели [7] коэффициентов весовости, основанных на оценках по среднеарифметическому значению, существенно повышает их эффективность и расширяет круг пользователей. Аналитически эта оценка может быть представлена в виде

$$Q_{об} = \sum_{j=1}^n Q_j g_j, \quad (1)$$

где n — общее количество учитываемых параметров сварочного аппарата; Q_j — показатель качества; g_j — коэффициент весовости j -го параметра.

Показатели качества, основанные на среднегеометрическом подходе, находятся путем простого перемножения дифференциальных показателей, характеризующих отдельные параметры. Обычно для расчета $Q_{об}$ без учета весовых факторов пользуются формулой из работы [8]:

$$Q_{об} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n Q_j^{g_j}}. \quad (2)$$

Если же модель (2) уточнить путем введения коэффициентов весовости, то получим [9]

$$Q_{об} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n Q_j^{g_j}}. \quad (3)$$

Модель в форме (3) не получила достаточно широкого распространения. Характерные особенности этого подхода описаны в работах [9, 10].

Поиск новых путей обоснования обобщенной оценки качества промышленной продукции привел некоторых авторов к созданию моделей, основанных на среднегармоническом значении $Q_{об}$ [6, 11]. Такой подход необходим при анализе дифференциальных параметров с большими флуктуациями — частных показателей (ЧП) качества. Обычно данная модель задается в виде выражения

$$Q_{об} = \left(\sum_{j=1}^n g_j \right) / \left[\sum_{j=1}^n (g_j / Q_j) \right]. \quad (4)$$

Эта оценка является промежуточной между среднеарифметической и среднегеометрической оценками и для анализа ЧП качества используется достаточно редко.

Выбор модели оценивания $Q_{об}$ применительно к сварочному оборудованию. Как известно [12], расхождение в оценках качества, вычисленных по формулам (1)–(4) достаточно велико. Следовательно, ответ на вопрос, какой сварочный аппарат



лучше, будет зависеть от способа усреднения, а также от правильного задания коэффициентов весомости. Поскольку технические характеристики СО (или его ЧП) при серийном производстве изменяются в небольших пределах (до 20 %), то можно остановиться на средневзвешенных оценках.

Таким образом, для решения задачи определения технического уровня образцов серийного СО необходимы, во-первых, эталонный источник, описываемый вектором эталонных параметров $[P_{1(э)}, \dots, P_{n(э)}]$, и, во-вторых, задание границ областей, характеризующих параметры качества. Решение этих вопросов может основываться на ГОСТ 23554.2–81 «Экспертные методы оценки качества промышленной продукции».

Существуют многочисленные подходы к экспертному опросу. В работе [13] показано, что в квалиметрии наиболее широкое применение получили шесть моделей, отличающихся как постановкой задачи, так и обработкой полученных данных. Одним из наиболее предпочтительных методов экспертного опроса, который рекомендуется применительно к СО, является метод Делфи [14], предложенный Т. Дж. Гордоном и О. Хелмером. Кратко его суть можно изложить следующим образом:

ответы на поставленные вопросы относительно ЧП должны быть даны в количественном виде;

проводится, как правило, несколько циклов опроса, причем, чем больше расхождений в данных, тем больше количество этих циклов;

после каждого цикла опроса все эксперты знакомятся с ответами других участников;

каждый эксперт обязан аргументировать свое мнение об обсуждаемых характеристиках СО со ссылками на литературные источники, нормативные документы и пр., что позволит полнее учесть влияние различных факторов;

статистическую обработку полученных ответов необходимо проводить после каждого цикла опроса и с ее результатами ознакомить всех участников.

Таким образом, суть метода Делфи заключается в выявлении тенденций развития определенного типа СО. При этом прямые дискуссии исключаются, но экспертам предоставляется после каждого цикла опроса возможность оценивать свои суждения с учетом мнений и аргументированных доводов других участников. В настоящее время можно существенно ускорить процесс проведения опроса и повысить его качество благодаря Интернет-конференциям, к участию в которых привлекают высококвалифицированных специалистов.

Предположим, что необходимо определить средневзвешенный коэффициент качества (технический уровень) сварочного трансформатора. В

соответствии с паспортом изделия формируется набор ЧП, которые в зависимости от целевой функции могут либо быть выбраны из технических параметров, либо являться их комбинациями (функционалами). Формируемый набор ЧП должен обладать максимальной полнотой и определяться высококвалифицированными экспертами в области СО. Конкретный набор ЧП составляет базис и может рассматриваться как координаты вектора в базисном пространстве. Если конкретные значения координат взять из технических условий, то полученный вектор является эталоном; если же конкретные значения координат найдены путем измерения изделия, то полученный вектор характеризует это изделие. Набор векторов образует матрицу $[M]$, строки которой составляют ЧП, а количество столбцов равно качеству изделий (включая эталон).

Далее формируется матрица $[V]$ коэффициентов весомости, которая состоит из определенных векторов. Их количество может быть любым, но при этом точно соответствовать количеству ЧП. Физический смысл коэффициентов весомости заключается в том, что каждый из них определяет относительный вклад соответствующего ему ЧП в формирование средневзвешенного коэффициента качества, однозначно связанного с целевой функцией. Определение коэффициентов весомости осуществляется методом Делфи [12].

Дальнейшая процедура заключается в нахождении произведения матрицы $[M]$ на транспонированную матрицу $[V]$ коэффициентов весомости. Результат умножения представлен матрицей, строки которой образуются из средневзвешенных коэффициентов качества определенного изделия (вектор качества) на базисе целевых функций, где количество столбцов равно количеству целевых функций, а количество строк — количеству изделий.

Для примера рассмотрим определение средневзвешенных коэффициентов качества сварочных трансформаторов на массиве однотипных изделий, выполненных по единой технологической схеме. Частными показателями будем считать набор технических параметров, заданных техническими условиями. К ним относятся напряжение холостого хода $U_{х.х}$ (В), ток короткого замыкания $I_{к.з}$ (А), рабочий ток I_p (А), коэффициент полезного действия (КПД, %) и коэффициент мощности $\cos \varphi$ (безразмерный).

Первая строка матрицы $[M]$ состоит из технических параметров, которые записаны в технических условиях (вектор-эталон). Последующие строки состоят из конкретных значений, полученных путем их измерения на изделиях в процессе испытаний. В результате матрица $[M]$ принимает вид, показанный в табл. 1.

Матрица $[V]$ коэффициентов весомости для двух целевых функций (сварочно-технологические свойства F_1 и энергоэкономичность F_2) состоит из элементов, представленных в табл. 2.

Для исключения влияния размерности величин, входящих в матрицу $[M]$, последнюю можно модифицировать путем деления каждого элемента соответствующего столбца на его паспортное зна-

Таблица 1. Частные показатели, полученные путем измерения характеристик сварочных трансформаторов

Образец (изделие)	$U_{х.х}$, В	$I_{к.з}$, А	I_p , А	КПД, %	$\cos \varphi$
Эталон	80	220	150	75	0,60
№ 1	75	215	145	70	0,55
№ 2	78	200	155	65	0,5
№ 3	70	190	140	55	0,4



Таблица 2. Коэффициенты весомости для целевой функции

Целевые функции	$U_{x,x}$, В	$I_{k,z}$, А	$I_{p,r}$, А	КПД, %	$\cos \varphi$
F_1	0,9	0,5	1,0	0,7	0,5
F_2	0,7	0,5	0,9	1,0	1,0

Таблица 3. Относительные частные показатели сварочных трансформаторов

Образец (изделие)	$U_{x,x}$, В	$I_{k,z}$, А	$I_{p,r}$, А	КПД, %	$\cos \varphi$
Эталон	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
№ 1	0,94	0,98	0,97	0,93	0,92
№ 2	0,98	0,91	1,03	0,83	0,83
№ 3	0,86	0,86	0,93	0,73	0,67

чение, т. е. на элемент первой строки. Процедура перенормировки не является обязательной, однако ее отсутствие в ряде случаев затрудняет интерпретацию результатов расчета. После перенормировки матрица $[M]$ принимает вид, показанный в табл. 3.

Произведение матриц

$$[M] \cdot [V] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,94 & 0,98 & 0,97 & 0,93 & 0,92 \\ 0,98 & 0,91 & 1,03 & 0,87 & 0,83 \\ 0,86 & 0,86 & 0,93 & 0,73 & 0,67 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,9 & 0,7 \\ 0,5 & 0,5 \\ 1,0 & 0,9 \\ 0,7 & 1,0 \\ 0,5 & 1,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,60 & 4,10 \\ 3,42 & 3,88 \\ 3,39 & 3,78 \\ 2,98 & 3,27 \end{bmatrix}$$

состоит из абсолютных средневзвешенных оценок изделий, которые прошли испытания. Переход к относительным (в сравнении с эталоном) единицам (табл. 4) дает возможность сравнивать изделия (в пределах целевых функций) и ранжировать их по качеству непосредственно в производственных условиях.

Аналогично можно сформулировать ЧП и значения коэффициентов весомости для других типов СО (выпрямителей, полуавтоматов, инверторов и пр.) и на их основе получить обобщенные оценки качества любого типа СО.

Описанная модель определения обобщенной оценки качества сварочных трансформаторов и алгоритмы, полученные на ее основе, использованы авторами настоящей работы для создания программного обеспечения применительно к специализи-

Таблица 4. Показатели качества сварочных трансформаторов

Образец (изделие)	F_1	F_2
Эталон	1,00	1,00
№ 1	0,95	0,95
№ 2	0,94	0,92
№ 3	0,83	0,80

рованному испытательному стенду [15], разработанному в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с фирмой «СЭЛМА». Программные модули, выполненные с использованием интегрированного пакета LabView, могут применяться производителями СО для его непрерывного мониторинга качества.

1. Гафт М. Г., Сергеев В. И. Методы оценки технического уровня изделий машиностроения // Машиноведение. — 1986. — № 6. — С. 50–53.
2. Михайлов В. П., Оноприенко В. Д. Корреляционная модель развития вида техники // Исследования по истории и теории развития авиационной и ракетно-космической науки и техники. — М.: Наука, 1981. — С. 179–190.
3. Дербишер Л. В. Оценка качества продукции при государственной аттестации // Измерение качества продукции. Вопросы квалиметрии. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — С. 116–134.
4. Мальцев А. Н., Соломащенко А. Е. Модель комплексной оценки уровня качества продукции // Электронная техника. Сер. Экономика и системы управления. — 1979. — Вып. 4(33). — С. 68–74.
5. Куцевич К. Б., Михайлов Ю. В., Савичев В. В. Метод оценки технического уровня разработок новой техники // Там же. — 1982. — Вып. 3(44). — С. 12–14.
6. Федоров М. Ф. О комплексной оценке качества промышленных изделий // Техн. эстетика. — 1966. — № 3. — С. 13–16.
7. Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. Актуальные проблемы квалиметрии // Стандарты и качество. — 1970. — № 1. — С. 37–40.
8. Целикова А. Т. Аттестация продукции и рентабельность // Там же. — 1969. — № 10. — С. 58–59.
9. Шпекторов Д. М., Фишер А. А. О соотношении показателей качества // Техн. эстетика. — 1967. — № 1. — С. 34–36.
10. Райхман Э. П. К вопросу оценки показателей качества // Стандарты и качество. — 1969. — № 9. — С. 17–23.
11. Райхман Э. П. Экспертный метод оценки качества приборов // Измерит. техника. — 1970. — № 11. — С. 44–47.
12. Азгальдов Г. Г. Проблемы измерения и оценки качества продукции. — М.: Знание, 1969. — 112 с.
13. Eckenrode R. T. Weighting multiple criteria // Management Science. — 1965. — 12, № 3. — P. 43–52.
14. Добров Г. М. Типология прогнозов и анализ метода Делфи // Анализ тенденций и прогнозирование научно-технического прогресса. — Киев: Наук. думка, 1967. — С. 329–336.
15. Система оперативного контроля качества сварочного оборудования в процессе его промышленного производства // Б. Е. Патон, А. Е. Коротынский, В. И. Юматова и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 29–31.

Variants of determination of quality characteristics of welded equipment are considered. Assessment calculation of weighted mean characteristics of quality of welded transformers, which are manufactured by a single technological scheme under the conditions of serial production, is given.

Поступила в редакцию 15.06.2004



СВАРИВАЕМОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ СВАРКИ МАТЕРИАЛОВ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы существующие способы соединения материалов с учетом агрегатного состояния вещества в зоне соединения. Отмечена необходимость пересмотра термина «свариваемость» и разработки обобщенного количественного критерия его оценки. Высказаны необходимые предпосылки для создания перспективных, в том числе гибридных процессов сварки.

Ключевые слова: сварка, неразъемное соединение, сварка плавлением, сварка давлением, парогазовое состояние, свариваемость, обобщенный критерий, перспективные процессы соединения

Со дня официальной регистрации электрической дуги как источника нагрева для сварки металлов прошло более 110 лет. За это время сварка плавлением как технологический процесс соединения металлических материалов заняла прочное место среди других. Высокая эффективность, низкая стоимость и универсальность способствовали его широкому развитию и применению для соединения сначала простых сталей на основе железа, затем сложнoleгированных 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 соединение материалов происходит путем их расплавления, т. е. через жидкую фазу.

На протяжении последних десятилетий поставлены и реализованы задачи по созданию других способов соединения металлов. Получили промышленное применение процессы сварки давлением металлов в твердой фазе, основанные на известной ранее схеме соединения металлов, доведенных до пластичного состояния за счет необходимой степени сжатия (например,ковки) при нормальных или повышенных температурах. К ним относятся холодная сварка (соединения алюминия, меди, низкоуглеродистой стали), диффузионная, сварка трением, контактная сварка сопротивлением, сварка взрывом, магнитно-импульсная, сварка прокаткой заготовки для получения би- и триметаллического листа и др. В этих процессах реализована возможность формирования соединения металлических материалов в условиях нахождения их во втором агрегатном состоянии, т. е. в твердой фазе.

Примерно 40...50 лет назад начались исследования по использованию для соединения металлов третьего агрегатного состояния — газообразного. Вещество превращалось в парообразное состояние, а затем конденсировалось на основе (подложке). При этом обеспечивался физический контакт и соединение конденсированного вещества

с основой. В качестве испаряемого, т. е. конденсируемого материала подложки, могли использоваться любые вещества (металлы и неметаллы) в необходимом сочетании. Это обусловлено тем, что в парообразном состоянии смешивание материалов происходит в их количественных соотношениях, соответствующих стехиометрическим. Получили развитие такие процессы соединения (прежде всего при нанесении покрытий), как физическое (PVD) и химическое (CVD) осаждение из паровой фазы — соответственно физическая и химическая паровая конденсация материалов на основу. В первом случае реализована способность конденсирования испаряемого вещества из парогазообразной фазы в виде чистого металла или сплава на основу из другого, не участвующего в образовании паровой фазы вещества. Во втором — возможность образования нового вещества путем химического взаимодействия с поверхностью подложки активного вещества, находящегося в газообразном состоянии. Например, образование слоя из нитридов титана на поверхности титановой подложки в результате реакции с газообразным азотом. Может быть реализована также комбинация процессов PVD и CVD. Важным является тот факт, что одновременно с конденсацией (химической реакцией) достигается получение высококачественного соединения разных по своей природе материалов.

Вакуумные парогазовые физические и химические процессы получили интенсивное развитие и реализованы в многочисленных технологиях. Таким образом, в большей или меньшей мере на практике в виде конкретных технологий реализованы способы сварки материалов с использованием всех трех видов агрегатного состояния вещества (твердой, жидкой и парогазовой фаз) в зоне соединения (рис. 1).

Очевидно, что может быть использовано и четвертое агрегатное состояние вещества (ионное), т. е. когда материалы находятся в состоянии высокозаряженных частиц ионов и переносятся на соединяемую поверхность при наличии соответствующих условий.

В перечисленных выше агрегатных состояниях вещества образование неразъемных соединений связано с локальным или общим тепловым воздействием на свариваемый материал. В связи с

этим возникают условия, изменяющие его структурное и напряженно-деформированное состояние.

Различные материалы реагируют на изменения в зоне соединения и прилегающей зоне неодинаково, в зависимости от их теплофизических свойств, полноты структурных превращений, возникших от вводимой тепловой энергии, и целого ряда других факторов, характерных для данных условий сварки. Весь этот комплекс изменений определяет способность материала к образованию неразъемного соединения с обеспечением некоего заданного уровня служебных свойств. В научной литературе эта способность материала определяется термином «свариваемость».

Очевидно, что при анализе или разработке перспективных процессов соединения (сварки) материалов целесообразно учитывать такие факторы: агрегатное состояние материала непосредственно в зоне шва, при котором осуществляется технология соединения материала;

влияние технологии на структурное и напряженно-деформированное состояние сварного соединения в целом;

взаимосвязь технологии и обобщенной характеристики свариваемости (соединяемости) материалов;

экономические, экологические и социальные особенности процесса.

При этом особую важность приобретает возможность использования объективных критериев оценки соединяемости (свариваемости) конструкционных материалов.

Исходя из отмеченного, попытаемся уточнить термин «свариваемость» материалов, а также рассмотрим некоторые существующие и перспективные процессы соединения конструкционных материалов.

Свариваемость. Вопросу свариваемости материалов за все годы существования сварочной науки уделялось большое внимание. Существуют десятки национальных нормативных документов и международных стандартов, в которых сделана попытка регламентировать термин «свариваемость» материалов. Во то же время публикации последних лет только подтверждают, что изучение свариваемости остается одной из наиболее важных и первоочередных задач мирового уровня. Постепенно термин «соединение» вытесняет термин «сварка». На наш взгляд, изменение в терминологии имеет концептуальный характер, заключающийся в более общем понимании самих условий получения неразъемных соединений из любых материалов. Непосредственно сварной шов может образовываться и без стадии плавления материала, а также не иметь четко выраженных размеров и признаков.

Если рассматривать современные материалы, из которых следует изготавливать сварные конструкции, то многие из них исходя из существующих представлений о свариваемости относятся к трудносвариваемым или вообще к несвариваемым. Тем не менее, получение неразъемных соединений таких абсолютно хрупких материалов, как керамика, стекло, высокопрочные стали и сплавы, чугуны, композиты, монокристаллы, сегодня являются ре-

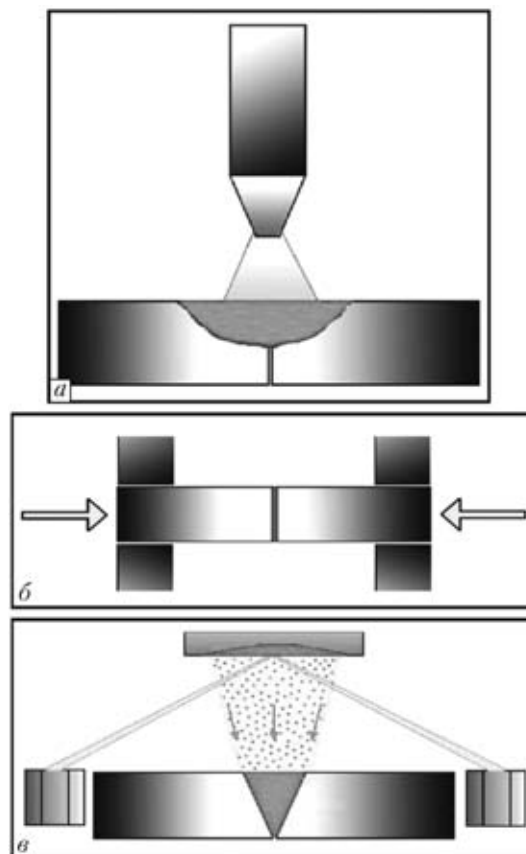


Рис. 1. Состояние материалов в зоне соединения: а — жидкая фаза; б — твердая; в — парогазовая

альностью. Назрела необходимость в новом толковании термина свариваемости (соединяемости) материалов.

Очевидно, что термины «свариваемость» и «соединяемость» должны учитывать комплекс сведений о соединяемом материале (химический состав и структурные состояния); влияние предполагаемой технологии на сваренный (соединенный) материал, структурное, термонапряженное состояние, образование дефектов, свойств; влияние внешней среды на сваренный (соединенный) материал при эксплуатации в изделии (изменение во времени структуры и свойств, вызванных наличием сварного соединения в изделии).

Практически во всех известных, в том числе международных и национальных стандартах, в определениях свариваемости упоминается, что необходимы «соответствующий технологический процесс», «определенный процесс и определенная технология», «подвергается сварке любым способом» и «без специальных мер» (в случае совершенной свариваемости), «при установленной технологии», «при соответствующей процедуре сварки», т. е. влияние технологии как таковой на свариваемость упоминается, однако рекомендации носят условный или философский характер.

Во всех случаях в том или ином виде определение свариваемости включает учет таких понятий, как «собственное качество свариваемых деталей и конструкций, которые они образуют», или «сварные швы должны удовлетворять соответствующим требованиям по свойствам и влиянию на



Свариваемость различных материалов с учетом их агрегатного состояния в зоне соединения

Тип материала	Свариваемость методом плавления	Свариваемость (соединяемость) с учетом агрегатного состояния вещества		
		Жидкая фаза	Твердая фаза	Парогазовая фаза
Высокопрочные алюминиевые сплавы	Ограниченная	Ограниченная	Хорошо свариваемые	Хорошая
Высокопрочные титановые сплавы	» »	» »	» »	» »
Высокопрочные стали	Трудносвариваемые	Трудносвариваемые	Ограниченно свариваемые	» »
Никелевые суперсплавы	Несвариваемые	Несвариваемые	» »	» »
Интеллектуальные сплавы	Ограниченно свариваемые	Ограниченная	» »	» »
Гранулированные сплавные порошковые материалы	» »	» »	» »	» »
Аморфные, микрокристаллические материалы	» »	» »	Не исслед.	» »
Наноструктурные материалы	Несвариваемые	Несвариваемые	Ограниченно свариваемые	Ограниченно свариваемые
Полимерные композитные материалы	» »	» »	» »	Хорошая
Интерметаллиды:	» »	» »	» »	» »
на основе Al ($Al+B_2Al+SiC$)	» »	» »	Несвариваемая	» »
на основе Ti (Ti_3Al (α -фаза), $TiAl$, Ti_3Al (γ -фаза))	» »	» »	Хорошая	» »
на основе Ni (Ni_3Al , $NiAl$, $NiAl-Mo$)	» »	» »	Трудная	» »
на основе Co (Co_xAl_y)	» »	» »	» »	» »
Керамика	» »	» »	Несвариваемая	» »
Адаптированные композитные материалы	» »	» »	Ограниченно свариваемые	» »
Упрочненные углеродным волокном пластики (АКМ-1U)	» »	» »	» »	» »
Металлополимерные материалы	Ограниченно свариваемые	Ограниченно свариваемые	» »	» »

конструкцию», или «получения соединения, свойства которого позволяют полностью использовать материал», или «сварное соединение должно отвечать требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия», т. е. в этих понятиях просматривается субъективность оценки свойств соединений, которые будут получены.

На основе многолетнего мирового опыта использования сварки можно выдвинуть следующие положения, учет которых необходим при уточнении понятия свариваемости:

свариваемость (соединяемость) является свойством материала;

свариваемость (соединяемость) в привычном представлении изменяется в зависимости от технологии, применяемой для данного вида конструкций;

свариваемый материал может переходить в несвариваемый (таблица) с изменением технологий, и наоборот;

технологические процессы соединения для разных агрегатных состояний формирования шва различны как по своему физическому принципу, так и тепловому (силовому) воздействию на свариваемый (соединяемый) материал;

тепловое и силовое воздействия на шов и зону термического влияния для разных технологических процессов оказывают различную степень влияния на структурные, физико-химические, механические и другие функциональные свойства материалов;

тепловые и силовые воздействия оказывают влияние на величину, характер протекания и фик-

сированную величину текущих и остаточных напряжений, а также деформаций в сварном (соединяемом) материале и соединении в целом;

технологический процесс и сопутствующее ему тепловое и силовое воздействия на материал, а также напряженно-деформированное состояние определяют уровень деградации материала. Последний оценивается по отношению к исходному материалу или требованиям допускаемых показателей функциональных свойств и качества как в процессе изготовления, так и эксплуатации конструкций.

Выдвинутые положения позволяют предложить новую формулировку свариваемости (соединяемости) материалов. *Свариваемость (соединяемость) — свойство материала образовывать неразъемное соединение с требуемым качеством и уровнем физико-механических и функциональных свойств соединения как в процессе его получения, так и при эксплуатации изделия. Свариваемость определяется степенью деградации свойств соединения в целом и рассчитывается как интегральный показатель.*

Управление свариваемостью может осуществляться на основе варьирования степени деградации.

Совершенствование способов соединения материалов. Наличие и использование трех агрегатных состояний вещества при формировании шва и соединения в целом, а также естественное желание обеспечить при этом минимальную деградацию материала служат основой для разработки

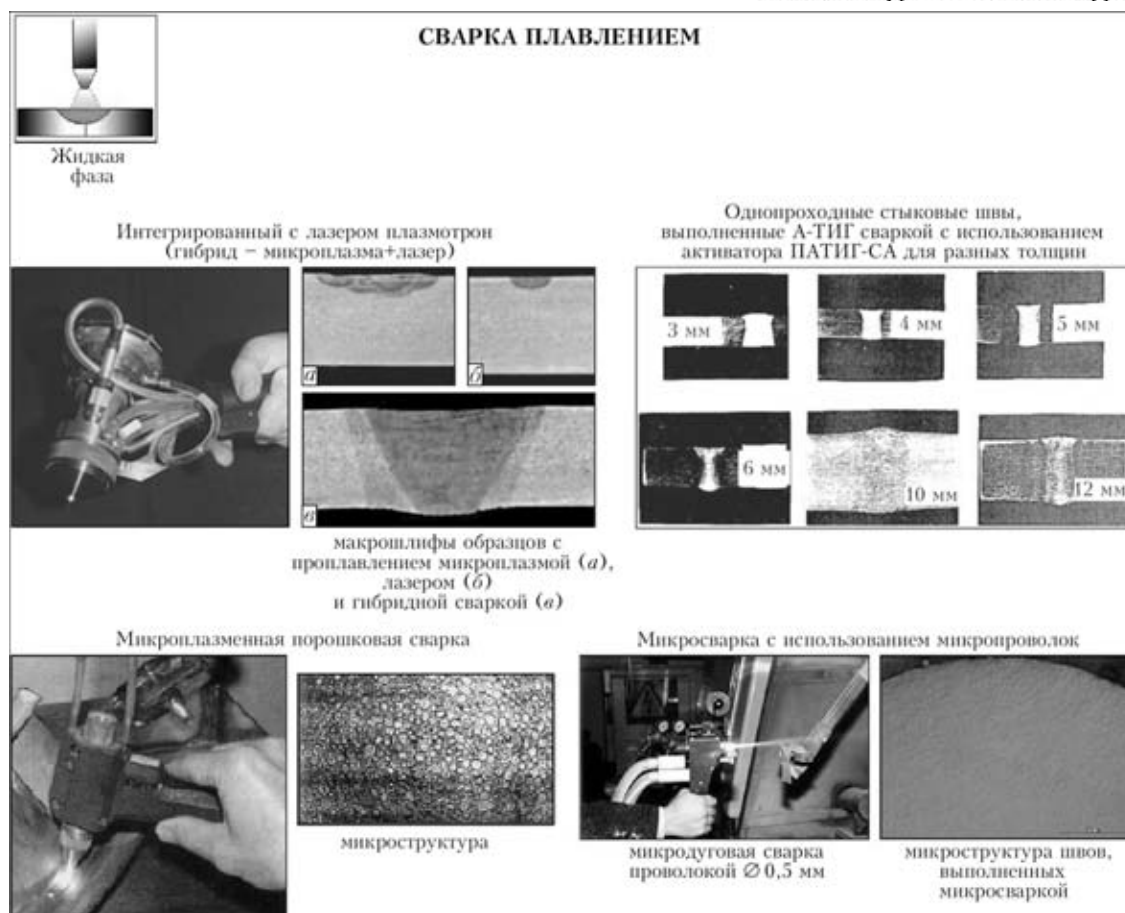


Рис. 2

новых или совершенствования известных технологических процессов. Как уже упоминалось выше, под деградацией подразумевается не только фактическое изменение химического, структурного состава материала, но и его термонапряженное состояние, изменение свойств как в процессе получения соединения (изделия), так и в процессе его регламентированной эксплуатации. Необходимость обеспечения минимально допустимой степени деградации при реализации технологии у соединения накладывает определенные ограничения или требования к самому процессу. В общем виде они могут сводиться к следующему: минимально возможное тепловложение в зону образования соединения; управление структурным и химическим составами, а также свойствами материала в зоне соединения; максимально возможные ограничения размера шва и зоны термического влияния; управление напряженно-деформированным состоянием при получении соединения; экономичность и экологическая безопасность процесса.

Рассмотрим с этой точки зрения некоторые перспективные процессы соединения.

Соединение (сварка) плавлением. По объемам применения классическая дуговая сварка плавлением еще долгие годы будет господствовать над остальными (электронно-лучевой, лазерной и др.). Тем не менее, все больше возникает необходимость в создании новых способов соединения (сварки) материалов. Наиболее существенные причины этого следующие:

электрическая дуга как концентрированный источник нагрева (введение тепла в свариваемый материал) утратила свое первенство по сравнению с электронно-лучевым, лазерным способами и теперь гибридными процессами;

в процессе расплавления дугой основного и присадочного металла и формирования шва возникают необратимые изменения в сварном соединении. Это относится к остаточным напряжениям и деформациям, структурным состояниям металла, изменяемым в худшую сторону в результате различных тепловых физических и структурно-чувствительных свойств свариваемого материала. И только специальные приемы, такие, как подогрев или последующая термическая обработка, устраняют этот недостаток при сварке, например, высокопрочных сталей;

появилось значительное количество новых конструкционных материалов, которые по целому ряду условий в общепринятых терминах относятся к «несвариваемым» или «ограниченно свариваемым» при дуговой сварке, т. е. с помощью классической дуги получить функционально пригодные сварные соединения из них не представляется возможным. Другими словами, нагрев электрической дугой переводит эти материалы (композиты, интерметаллиды, полимерные пластины, аморфные стекла, микрокристаллические материалы с наноструктурой и др.) в разряд «несвариваемых»;

необходимость значительного введения объема присадочного металла для формирования шва, а кроме того, операции по подготовке кромок, из-



Рис. 3

готовлению и расходу проволок, электродов, флюсов, что значительно удорожает и усложняет производство конструкций.

Среди новых перспективных процессов плавлением следует отметить (рис. 2) различные комбинации гибридных процессов (лазер + плазма; лазер + ТИГ и др.), ТИГ сварку с применением активирующего флюса; микродуговую сварку с использованием микропровода диаметром 0,4...0,6 мм; микроплазменную порошковую сварку и наплавку с использованием ультрадисперсных порошков, в том числе из композиционных материалов; реактивно-диффузионную сварку.

В этих процессах реализуется возможность снижения теплового воздействия дуги при одновременном повышении эффективности плавления и снижения размеров шва и соединения в целом. Очевидно, что активация и локализация процесса плавления свариваемого металла будет и в дальнейшем одним из перспективных направлений.

Особое внимание заслуживает реактивно-диффузионный способ соединения в минимальный зазор, что позволяет получать прецизионно точные изделия сложной формы.

Соединение в твердой фазе. Многие годы успешно используется контактная сварка оплавлением и сопротивлением. Различные виды конденсаторной сварки, сварки трением, диффузионной сварки и сварки взрывом доказали возможность соединения трудносвариваемых, в том числе разнородных материалов с достаточно высоким качеством и меньшей степенью деградации, чем при сварке плавлением.

Особый прорыв достигнут в сварке трением. Очевидно, что сварка в твердой фазе или квазитвердом состоянии будет интенсивно развиваться. Следует ожидать, что будут найдены эффективные пути активации поверхности деталей, соединяемых в твердой фазе. Это позволит снизить вводимую энергию для образования соединения, а значит и уменьшить последующую деградацию материала.

Среди новых процессов соединения в твердой фазе (рис. 3) заслуживают внимания следующие: различные модификации сварки трением; диффузионная сварка материалов с прослойками, активирующими процесс соединения; разрядно-импульсная сварка с испаряемой промежуточной прослойкой, конденсацией и имплантацией вещества расходуемого электрода; магнитно-импульсная и ударная сварка в вакууме; прессовая сварка нагревом кромок дугой, вращающейся в магнитном поле; модификации сварки взрывом.

Соединение с использованием парогазового состояния вещества. Этот вид соединения получил распространение при нанесении покрытий. Наиболее перспективным является испарение металла с использованием электронного луча (PVD). Этот процесс позволяет получать в качестве монолитного материала (в том числе в зоне соединения) различные по своему строению композиции.

На рис. 4 приведена схема процесса электронно-лучевого испарения материалов, показаны микроструктуры композиционных материалов на основе металла и керамики, а также изделия в виде конструкционного материала и термобарьерных покрытий. Соединение между разнородными ма-

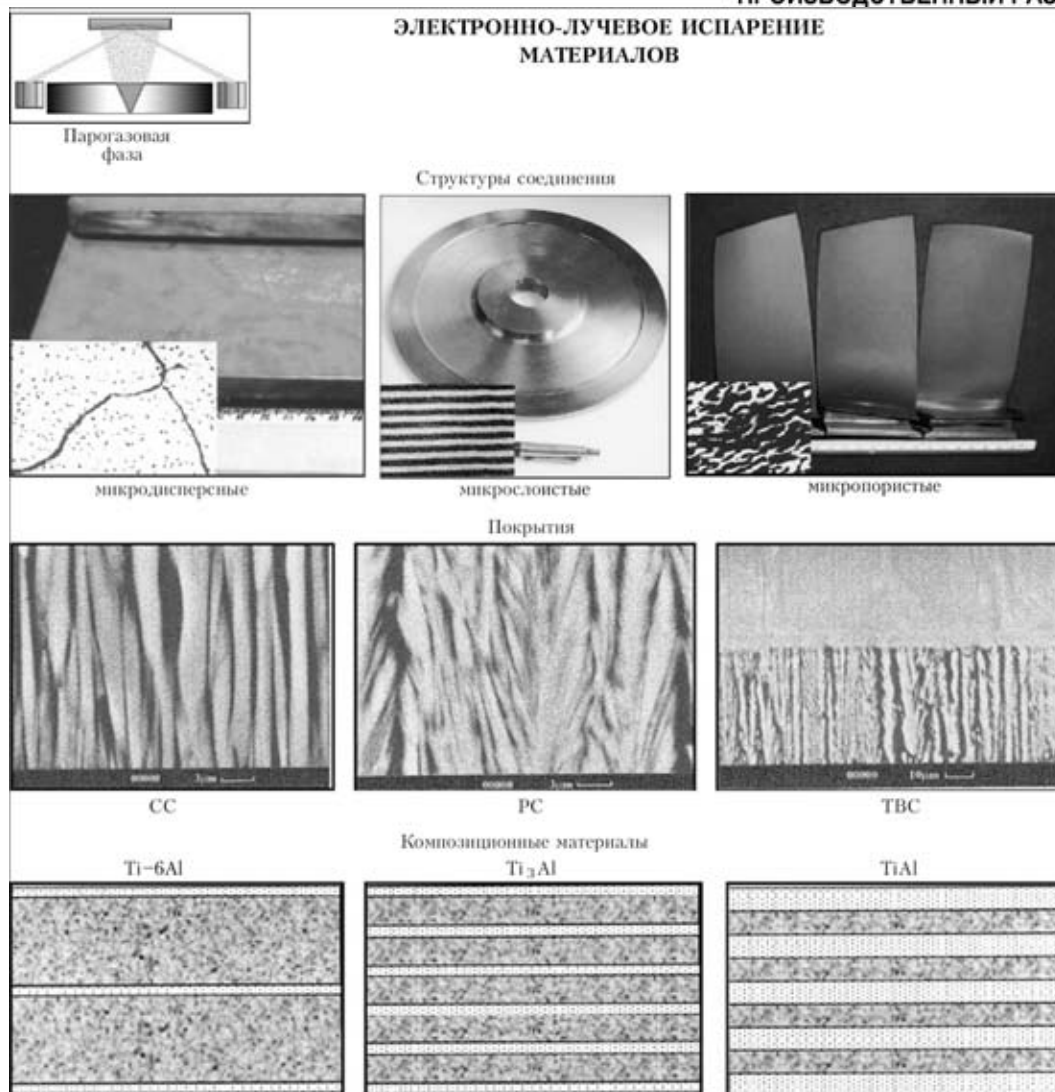


Рис. 4

териалами (металл + керамика) осуществляется с высокой степенью качества и низкой деградацией свойств. Этот принцип получения композиционных материалов, в том числе при образовании соединения (шва), перспективен и как процесс, и как система легирования непосредственно шва.

Выводы

1. Надежные соединения многих материалов достигаются благодаря нахождению в зоне соединения веществ в различном агрегатном состоянии.

2. Предлагается рассматривать соединяемость (свариваемость) как свойство материала и оценивать это свойство в зависимости от используемой технологии соединения по степени деградации материала по сравнению с этим материалом в исходном состоянии.

3. Соединяемостью (свариваемостью) можно управлять посредством изменения деградации материалов.

Available methods for materials joining, allowing for an aggregate state of a material within the joining zone, are analysed. The need to revise the term «weldability» and develop a generalised quantitative criterion for evaluation of weldability is noted. The necessary premises for development of advanced, including hybrid, welding processes are presented.

Поступила в редакцию 05.07.2004



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ УДАРОМ (Обзор)

Л. Д. ДОБРУШИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализирован мировой уровень промышленных технологий сварки взрывом (источник энергии — взрывчатое вещество) и высокоскоростным ударом (источники энергии — пневматические и пороховые ствольные устройства, высокоскоростные водяные струи). Особое внимание уделено попыткам создания ручного инструмента для локальной (точечной) сварки высокоскоростным ударом. Кратко рассмотрены возможные перспективы совершенствования и развития технологий сварки взрывом и высокоскоростным ударом.

Ключевые слова: сварка взрывом, сварка высокоскоростным ударом, конструкционные материалы, ручной инструмент

Уже более 40 лет сварку взрывом (СВ) успешно применяют в различных отраслях промышленности. В специальной литературе неоднократно публиковались материалы обзорного характера, освещающие опыт применения СВ [1–4].

Основными областями применения СВ в бывшем СССР и странах СНГ являются производство биметаллов и изготовление из них трубных досок для мощных теплообменных аппаратов массой до десятков тонн, двух- и трехслойных материалов для оборудования, работающего в агрессивных средах, плакирование лопастей турбин для ГЭС ка-

витационно-стойкими покрытиями, плакирование покрытиями из бронзы поверхностей скольжения тяжело нагруженных подшипников. Согласно данным работы [3], существует более 260 соединений разнородных металлов, полученных с помощью СВ и нашедших практическое применение. В качестве основного слоя преимущественно используют углеродистые и низколегированные стали, плакирующего — высоколегированные стали и сплавы меди, никеля, титана, алюминия, а также цирконий, тантал. Длительный опыт эксплуатации продемонстрировал долговечность и надежность соединений, полученных с помощью СВ.

На рис. 1 обобщены и классифицированы основные области применения СВ.

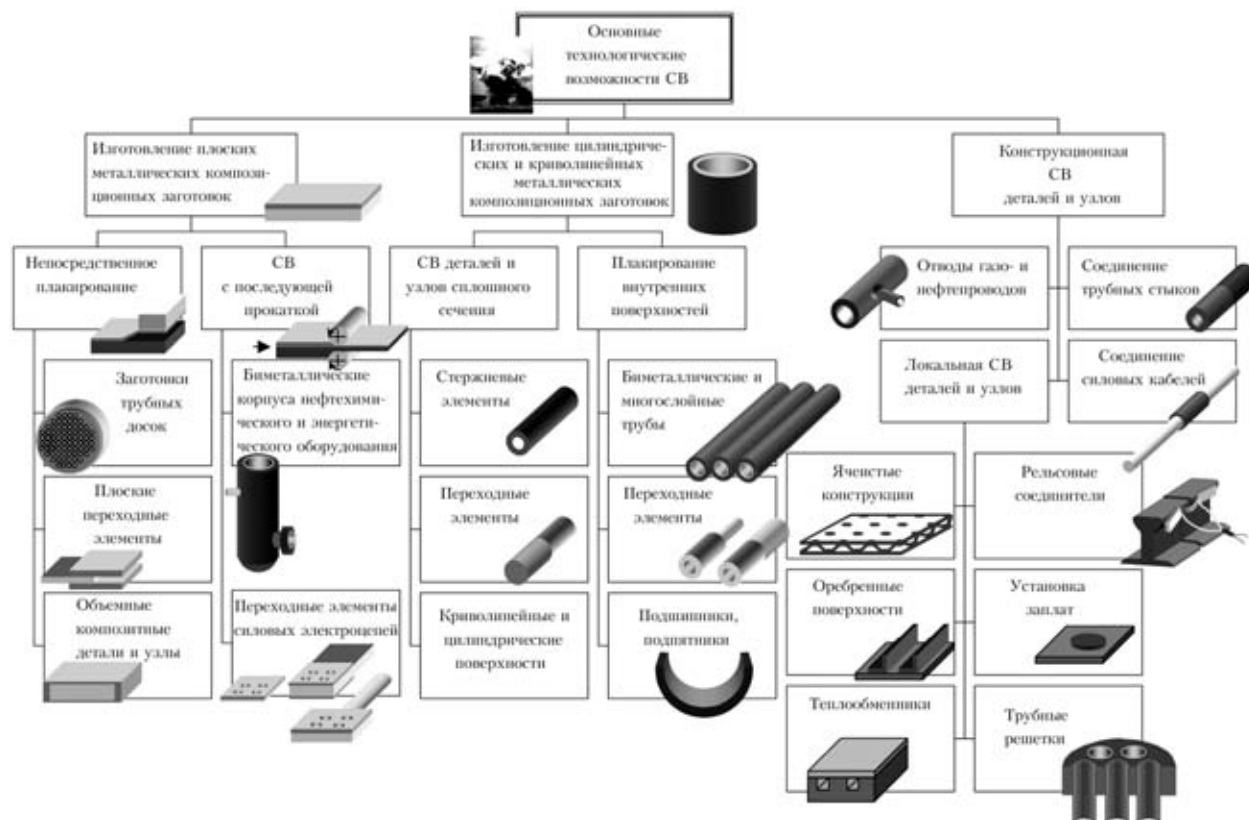


Рис. 1. Основные технологические возможности СВ в соответствии с классификацией, представленной в работе [4]

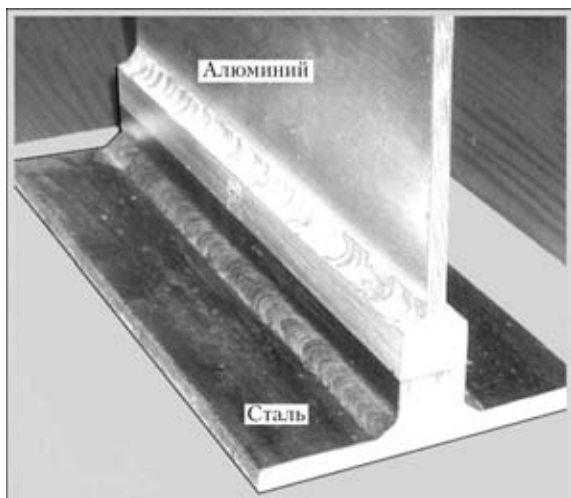


Рис. 2. Соединение алюминия со сталью, выполненное дуговой сваркой через биметаллический переходник, полученный СВ

Поскольку приведенная выше информация является общеизвестной, остановимся далее на примерах применения СВ, с которыми автор настоящего обзора ознакомился в последние годы в порядке личной инициативы и в процессе установления и развития сотрудничества с рядом зарубежных фирм.

Фирма SMT («Shockwave Metalworking Technologies», Нидерланды), организованная в 1962 г., успешно освоила производство биметаллов различных сочетаний и размеров. Основные области их применения: судостроение (переходники сталь + алюминий (рис. 2)), химическая и нефтяная промышленность (плакирование труб и изделий из них с антикоррозионными покрытиями, изготовление трубных досок для теплообменников, соединение труб), автомобилестроение (тормозные диски и подшипники), электротехника (токосъемные биметаллические рельсы, переходники для сильноточных цепей), различные изделия с антикоррозионными и износостойкими покрытиями. Фирма располагает двумя вакуумируемыми взрывными камерами мощностью 40 и 150 кг в тротиловом эквиваленте и имеет большой опыт СВ в глубоком вакууме. Специалисты фирмы утверждают, что выполнение СВ в вакууме позволяет уменьшить краевые непровары и увеличить суммарную площадь плакируемого изделия не менее чем на 20 %, а также снизить побочный звуковой эффект взрыва, что является принципиально важным для соблюдения Европейских норм по шуму при проведении взрывных работ.

Фирма «Dynamit Nobel» (торговая марка «Dynaplat», Германия) одной из первых освоила промышленное производство СВ коррозионностойких биметаллов для химической промышленности (трубные доски для теплообменников), цветной металлургии (переходники для сильноточных электрических цепей), вакуумного технологического оборудования (трубные переходники нержавеющая сталь+алюминий), судостроения. Фирма располагает открытым полигоном и подземным участком для проведения взрывных работ, а также оборудованием для правки плакированных взрывом



Рис. 3. Труба диаметром 1500 мм, плакированная изнутри слоем тантала СВ

вом изделий и их испытаний. Важным техническим показателем потенциала фирмы в области СВ может служить производство труб, плакированных изнутри танталовым покрытием (рис. 3). Диаметр труб составляет 1500 мм, длина — 7500 мм, толщина стенки — 15 мм, толщина покрытия — 1,0 мм. Вся продукция фирмы сертифицирована согласно международным стандартам.

Фирма «Nobelclad» (Франция) с 1968 г. использует СВ для производства биметаллов и входит в тройку мировых лидеров в этой области. Продукция фирмы весьма разнообразна. СВ используется при производстве химического и нефтехимического, ядерного и теплового (рис. 4) оборудования, в гидроэнергетике, производстве насосов и бумаги, пищевой промышленности, сельскохозяйственном машиностроении, изготовлении сильноточных биметаллических переходников и других изделий. Одним из приоритетных видов продукции фирмы являются сталеалюминиевые изделия для судостроения.

Основные параметры плакированных взрывом изделий могут быть следующими: толщина основного металла — 2...500 мм, толщина плакирующего слоя — 1...30 мм, максимальные габариты — 11,6×4,5 м, площадь однократного плакирования — 34 м², максимальная масса — 40 т.

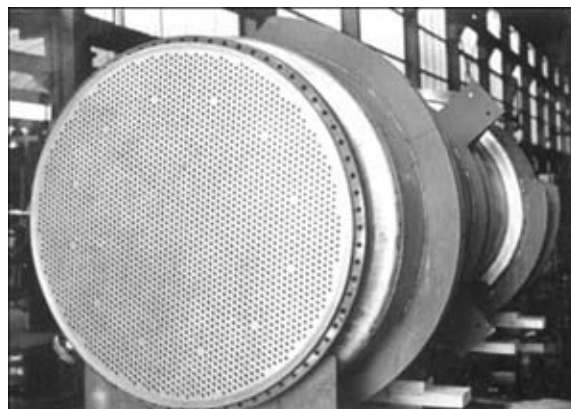


Рис. 4. Теплообменник, изготовленный с использованием биметаллической (сталь+титан) трубной доски

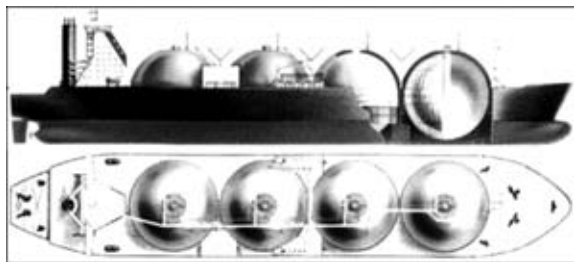


Рис. 5. Схема судна для перевозки жидкого азота с использованием 4-слойных переходников, полученных с помощью СВ

Существует уникальное оборудование для обеспечения взрывных работ и правки плакированных заготовок, а также оперативного разрушающего и неразрушающего контроля их качества. Вся продукция фирмы сертифицирована согласно международным стандартам.

Фирма «Nitro Metall AB» (Швеция), выделившаяся из «Nitro Nobel Group», производит широкий ассортимент продукции, в том числе для ядерной энергетики, судостроения и нефтедобычи в Северном море. Максимальная толщина биметаллических плит достигает 300 мм, а площадь — 30 м². Фирма производит плакирование взрывом биметаллических и многослойных заготовок и изделий, которые находят применение в строительстве морских ледокольных судов и судов для транспортирования жидкого азота (рис. 5). В последних используются 4-слойные (алюминий+титан+никель+нержавеющая сталь) переходники, с помощью которых обеспечивается крепление сферических хранилищ жидкого азота к корпусу судна. Фирма имеет исследовательскую лабораторию по контролю качества продукции на соответствие ISO 9002.

В Европе еще ряд фирм занимается СВ, но в рамках настоящего обзора осветить их деятель-

ность не представляется возможным (и в этом нет необходимости, поскольку по техническим возможностям, качеству и экономическим показателям они заняты конкурентным производством аналогичной продукции).

В последние годы технологии СВ широко внедрены в промышленность некоторых стран Юго-Восточной Азии, в частности Республики Корея. Следует отметить такие наиболее известные в этой стране фирмы, как HAN-WHA («Korea Explosives»), «Korea Heavy Industry Inc.», «DAEWHA». В этих фирмах используют преимущественно технологии, заимствованные в западных странах, но уровень их исполнения почти не уступает западному. В Японии под торговой маркой «BACLAD» производят биметаллические материалы с покрытиями из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, меди, бронзы, хастеллоя в листах площадью до 30 м². Очевидно, что СВ постепенно становится технологической операцией, доступной для использования большинству промышленно развитых стран мира.

При плакировании листов больших размеров, когда соединение металлов по всей поверхности не является необходимым, используют локальную СВ (точечную или линейную). Применение этих способов резко сокращает расход взрывчатого вещества (ВВ) и снижает стоимость продукции. Самый простой способ локальной СВ предусматривает расположение заряда ВВ в виде полосы на метаемой пластине, после чего свариваемые пластины погружаются в сосуд с водой на глубину 5...50 см. Вода, находящаяся над зарядом, ограничивает свободный разлет продуктов детонации и увеличивает зону направленного действия взрыва. Однако эффективность этого способа незначительна, и он нетехнологичен.

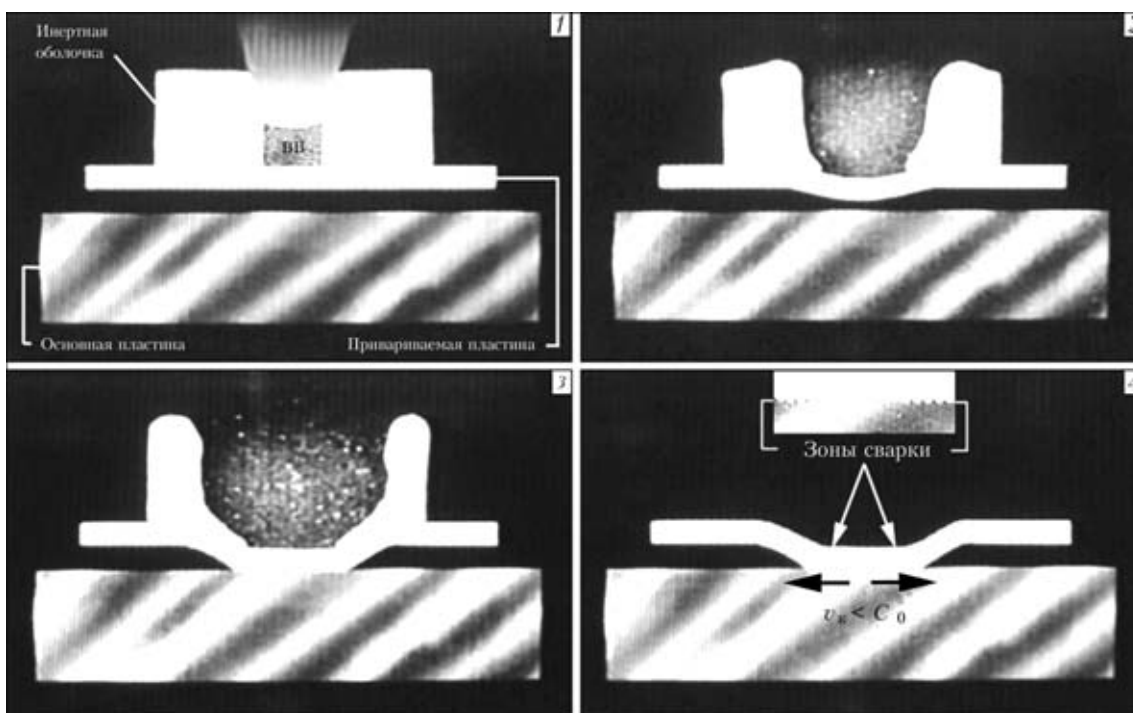


Рис. 6. Кинематика процесса точечной (линейной) сварки цилиндрическим зарядом ВВ, помещенным в оболочку из инертного материала: 1-4 — кадры последовательности процесса

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан более эффективный и технологичный способ локальной СВ. Сущность его заключается в том, что цилиндрический заряд ВВ со скоростью детонации 6000...8000 м/с и плотностью 1,60...1,65 г/см³ помещают в оболочку из инертного материала (резины или пластилина). Заряд располагают на поверхности привариваемой пластины перпендикулярно к ней (для точечной сварки) или вдоль нее (для линейной сварки). Кинематика процесса локальной СВ представлена на рис. 6 в виде фрагментов из фильма «Сварка и резка взрывом» (ИЭС им. Е. О. Патона, 1979 г.) и в комментариях не нуждается.

Локальная (точечная) сварка может осуществляться и в режиме высокоскоростного удара (СВУ), не требующего применения ВВ, о чем свидетельствует опыт мировых войн XX столетия. Этот процесс представляет несомненный интерес для практики настоящего времени прежде всего с точки зрения возможности относительно легкой реализации этого режима в лабораторных и цеховых условиях. Кроме того, режимы СВУ, в отличие от СВ, не сопровождаются действием остаточного давления продуктов детонации и избыточным импульсным действием на изделие.

В качестве энергетических средств разгона свариваемых пластин или деталей до необходимой скорости 250...500 м/с в существующих способах СВУ могут быть использованы электромагнитные ускорители, пороховые и пневматические ствольные системы, высокоскоростные водяные струи и другие ускорители или ударники. Все они должны обеспечивать в зоне соударения пластическую деформацию свариваемых поверхностей на заданную глубину и их прочное соединение.

Наиболее распространенной еще с 1950-х гг. технологией, которая может быть отнесена к СВУ, является технология магнитно-импульсной сварки, принципиальные основы которой и соответствующее оборудование разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона [5]. Аналогичные разработки, выполненные компанией «Pulsar, Ltd.» (Израиль), в настоящее время получили широкое развитие. Разгон свариваемых деталей и их соударение по этой технологии осуществляются под углом (как и при СВ) импульсом сильного магнитного поля (рис.

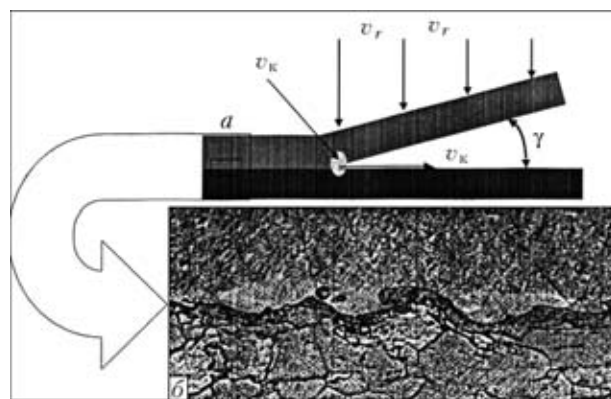


Рис. 7. Принципиальная схема процесса магнитно-импульсной сварки (а) и микроструктура сварного соединения (б); v_k — скорость точки контакта; v_r — скорость соударения

7). Технология оказалась весьма удобной и эффективной при серийном производстве коаксиальных изделий с обеспечением нахлесточного соединения разнородных материалов, в частности алюминий+медь. Однако промышленное применение данной технологии сопряжено с необходимостью создания или приобретения дорогостоящего оборудования.

Достаточно востребованными, особенно в последние годы, являются способы СВУ с использованием ствольных систем. Как следует из литературных источников и рекламных материалов, к настоящему времени разработано несколько вариантов таких систем. Впервые о точечной СВУ, как о физическом эффекте, сообщалось исследователями высокоскоростного удара в 1965 г. [6]. Было обнаружено, что при гиперзвуковом ударе микрочастиц или ударников по материалу, находящемуся в контакте с другим материалом, в месте удара происходит формирование точечной сварки между материалами.

Примерно десятью годами позже фирма «Explo-weld, Ltd.» (Швеция-Англия-Шотландия) представила в своем рекламном листке способ СВУ и устройство для его осуществления в виде ручного портативного пистолета для точечной сварки (рис. 8). В результате высокоскоростного удара пластины с основанием происходит образование соединения по кольцевой поверхности. Масса устройства составляет 6,5 кг, калибр — 18 мм. Толщина при-



Рис. 8. Ручной пистолет и принадлежности для точечной СВУ (а); макросечение (б) и микроструктура (в) сварного точечного соединения сталь+латунь, X50

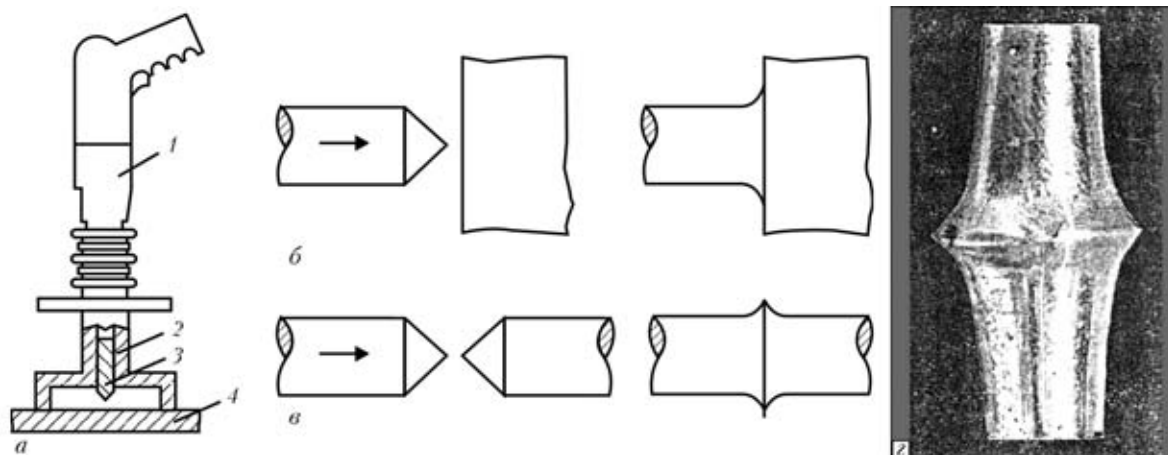


Рис. 9. Схема переносного устройства (пистолета) для СВУ шпилек (а), схемы процесса сварки шпилек с основанием (б) и между собой (в): 1 — пистолет-ускоритель шпилек; 2 — защитный чехол; 3 — шпилька; 4 — основание для приварки шпилек; з — фотография сваренных встык медных шпилек диаметром 9,5 мм [7]

вариваемой пластины не превышает 3 мм, диаметр свариваемого пятна обычно равен примерно 15 мм. В зависимости от толщины привариваемой пластины применяют три различных по мощности патрона. Комбинации свариваемых материалов такие же, как и при СВ, но привариваемая пластина должна по возможности иметь высокие пластические свойства.

В 1990-х гг. появились публикации о новом тогда процессе СВУ металлических шпилек [7, 8]. Устройство для СВУ сконструировано на основе ручного пистолета калибром 9,5 мм (рис. 9). Получены качественные соединения различных пар металлов как в безволновом, так и волновом режимах сварки. В частности, создано и эксплуатируется переносное приспособление для СВУ медных прутков встык и локального приваривания шпилек. Для увеличения пластических деформаций в зоне сварки разработчиками успешно использован технологический прием сведения торцов соединяемых шпилек на конус.

Перспективными представляются способы точечной СВУ с использованием ствольных систем и воды как передающей среды. Такие системы предполагают прямое метание «водяного снаряда» на плакирующую пластину и растекание по ее поверхности на площади, намного превышающей площадь поперечного сечения ствола, что снимает ограничения на форму и размер плакируемой поверхности.

Развитие техники гидроабразивной резки металлов способствовало созданию оборудования, генерирующего водяные струи сверхвысокой скорости (500...1000 м/с, напор в несколько сотен мегапаскалей). Область использования данного оборудования для СВУ ограничена малым сечением струй (обычно диаметр составляет десятки доли миллиметра, для самых мощных установок — 1...2 мм). Тем не менее, появился ряд работ немецких и арабских исследователей, в которых изучена эффективность применения высокоскоростных водяных струй для СВУ тонких фольг и пластин [8–12].

В 1976 г. впервые появилось сообщение группы исследователей Ганноверского технического уни-

верситета (Германия) о проявлении СВУ при резке алюминиевых листов водяными струями при давлении 70...350 МПа [8]. Сварку осуществляли при однократном ударе отрезка водяной струи по поверхности алюминия, накрытой без сварочного зазора алюминиевой фольгой толщиной 0,2 мм. Диаметр зоны соединения примерно в 3 раза превышал толщину листа (2 мм).

Годом позже опубликованы данные специального исследования эффекта, при котором получены высококачественные сварные соединения алюминия, меди, армко-железа, никеля, свинца, цинка, нержавеющей стали [9]. Площадь приваривания фольг толщиной 0,2...0,4 мм достигала 20 мм², а работа пластической деформации — 2...5 МДж/м². Реализовывались как волновые, так и безволновые режимы точечной сварки.

В 1996 г. группа исследователей из арабских стран предприняла аналогичные исследования, используя вместо стационарной установки для гидроабразивной резки модификацию ручного пистолета (рис. 10, а) [11]. Скорость водяного ударника, необходимая для образования сварного соединения, достигала 550 и 750 м/с при диаметрах сопел соответственно 5 и 3 мм.

На рис. 10, б изображена кинематическая схема процесса удара и растекания водяной струи о привариваемую к основанию пластину (фольгу), а также происходящей при этом пластической деформации пластины. Были оптимизированы фокусные расстояния (расстояния между соплом и свариваемой поверхностью). Определены оптимальные режимы сварки фольг толщиной от 0,1 до 0,25 мм из алюминия, низкоуглеродистой и нержавеющей стали с основанием из нержавеющей стали. Начальный зазор между фольгой и основанием изменяли от 0 до 2,5 мм. Определены сверхграничные по отношению к локальной сварке режимы истечения водяной струи, при которых уже происходит перфорация (пробивание) фольг. В статье [11] даны соответствующие практические рекомендации по применению технологии СВУ.

Рассмотренные ствольные системы относятся к малокалиберным и в основном могут применяться только для точечной СВУ ограниченных по тол-

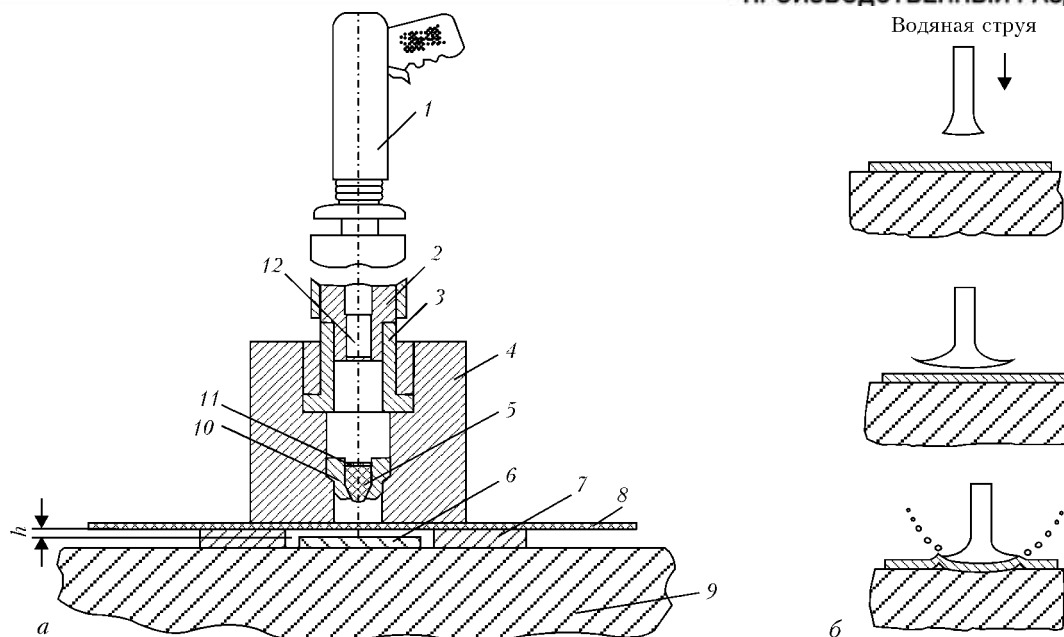


Рис. 10. Схема модифицированной конструкции водяного пистолета (а) и кинематическая схема процесса точечной сварки ударом водяной струи с помощью этого пистолета (б) [11]: 1 — пистолет; 2 — ствол; 3 — переходник; 4 — монтажная деталь; 5 — вода; 6 — основание; 7 — калибратор зазора; 8 — ускоряемая пластина; 9 — опора; 10 — сопло; 11 — пластмассовый диск; 12 — ударник; h — сварочный зазор

щине привариваемых пластин (фольг) и площади получаемых соединений. Для увеличения этих показателей необходимо использовать средне- или крупнокалиберные баллистические ствольные системы.

Как свидетельствуют данные работ [13, 14], первыми баллистические установки в исследованиях СВУ применили канадские ученые. Они использовали специально сконструированную пороховую пушку калибра 76 мм, способную разгонять легкий (дерево, пенопласт, капрон) поддон с закрепленной на нем метаемой пластиной (медь толщиной 3,175 мм) со скоростью до 800 м/с.

Таким образом, перечисленные варианты СВУ реализуются в плане классических представлений о СВ и режимах соударения, укладывающихся в обычное «окно свариваемости». И все же ВВ имеют большое преимущество по сравнению с энергетическими источниками СВУ, являясь источником мощности и большого запаса энергии и отличаясь намного большей универсальностью при решении практических задач СВ.

В любом случае сферой применения перечисленных технологий типа СВУ без ВВ останутся относительно мелкомасштабные изделия из преимущественно мягких пластичных металлов. Для высокопрочных металлов и крупномасштабных изделий использование СВ останется необходимостью. В связи с этим кратко коснемся вопроса о перспективах организации промышленных взрывных участков и специализированных полигонов.

Растущие требования к экологической чистоте технологий еще в конце прошлого века привели к вытеснению открытых взрывных работ из городов и ближних пригородных зон на удаленные полигоны. Ужесточение этих требований неизбежно влечет за собой дальнейшую организационную эволюцию. Вынос полигонных работ на расстояния

50...100 км и более связан с транспортными расходами и неудобствами для персонала. Поэтому для СВ среднемасштабных изделий более подходящим решением представляется создание в пригородных зонах участков взрывных камер усовершенствованной конструкции с автоматизированным циклом загрузки-разгрузки и очистки атмосферы. В этом отношении ИЭС им. Е. О. Патона располагает уникальной взрывной камерой трубчатого типа мощностью около 200 кг ВВ в тротиловом эквиваленте. Аналогичная промышленная взрывная камера успешно эксплуатируется в ГKB «Южное» (г. Днепропетровск, Украина).

В настоящее время в мире при выполнении крупномасштабных заказов по металлообработке взрывом все чаще используют подходящие крупные природные и техногенные объекты: заброшенные шахты, тоннели и портовые сооружения, пещеры, ненаселенные острова. Однако развитие этого направления сдерживается из-за отсутствия достаточного количества заказов для постоянной загрузки крупномасштабных полигонов, вследствие чего даже для такой страны, как Украина, их содержание пока экономически невыгодно.

Теория и практика СВ прошли уже длительный путь развития, однако ряд принципиальных проблем остается нерешенным до сих пор. Это связано с тем, что СВ представляет собой сложный физический процесс, в котором реализуются сверхвысокие физико-механические параметры и на субмикросекундные времена возникают огромные градиенты этих параметров в малых объемах (0,01... 0,30 мм). Сложность анализа процессов СВ такова, что ее исследование может занять еще не одно десятилетие. При этом общепризнано, что наиболее актуальным направлением дальнейших исследований СВ в ближайшие несколько лет будет исследование структуры «окна свариваемости»,



особенно области, прилегающей к его нижней границе, а также поиски технологических способов влияния на положение нижней границы.

К настоящему времени определились следующие основные направления поисков:

химическая подготовка соединяемых поверхностей;

«затягивание» времени существования положительного давления в зоне формирования соединения;

выполнение процессов металлообработки взрывом при повышенной начальной температуре и др.

Представляется, что в обозримом будущем технологические процессы СВ смогут осуществляться с выполнением целого комплекса мер, обеспечивающих надежное формирование соединения при низких скоростях и давлениях удара, а следовательно, при резко пониженных импульсах нагружения, степени упругопластического деформирования обрабатываемых конструкций и их элементов.

Весьма перспективным является развитие методов компьютерного моделирования СВ. До сих пор использование численных методов в СВ ограничивалось попытками моделирования волнообразования как физического явления и разработкой вспомогательных программ для расчета оптимальных режимов СВ, особенно в случае многослойной СВ.

Существует возможность компьютерного моделирования технологических задач СВ с расчетом полей напряжений и деформаций во всем объеме изделий, что намного дешевле и проще реального эксперимента. Неизбежная неточность расчетов и ограниченность постановок модельных задач не являются препятствием, так как после выполнения численного расчета для подбора оптимальных режимов достаточно проведение ограниченного количества проверочных экспериментов.

До сих пор применение технологического моделирования сдерживалось громоздкостью разработки и поддержания специального программного обеспечения (необходимостью иметь небольшой собственный «вычислительный центр» в технологическом подразделении). В настоящее время эти трудности сняты в связи с наличием удаленных систем и баз данных, получаемых через Интернет. Можно ожидать, что в последующие 10...20 лет компьютерное моделирование СВ превратится в рутинный технологический инструмент.

Что касается наиболее перспективных областей применения СВ, то исходя из наметившихся в пос-

ледние годы тенденций в промышленности как в Украине, так и странах СНГ и за рубежом, можно выделить следующие основные направления: внутреннее и наружное плакирование взрывом длинномерных труб и стержней; создание плоских и трубчатых электрических переходников и соединений различных типов и назначения; улучшение свариваемости и служебных свойств стыковых сварных соединений из высокопрочных алюминиевых сплавов с помощью предварительного или последующего их плакирования взрывом, а также другие частные задачи, возникающие при проектировании и изготовлении сварных металлоконструкций, когда СВ является наиболее востребованной и эффективной.

1. Crossland B. Explosive welding of metals and its application. — Belfast, Oxford: Clarendon press, 1982. — 233 p.
2. Сварка металлов взрывом. Композиционные материалы XXI века / В. И. Лысак, В. С. Седых, С. В. Кузьмин и др. // Наука — производству. — 2000. — № 1. — С. 12–17.
3. Коноп Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
4. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев и др. — М.: Интермет Инжиниринг, 2002. — 496 с.
5. Дудин А. А. Магнитно-импульсная сварка металлов. — М.: Металлургия, 1979. — 128 с.
6. Effects on oblique shocks produced at metal interfaces by hypervelocity particle impact / R. F. Rolsten, A. K. Hopkins, W. A. Dean, H. H. Hunt // Welding J. — 1967. — 46, № 11. — P. 517–522.
7. Salem S.A.L., Dawood K. A., Al-A'anie H.M. Spot welding by using high speed projection // Intern. J. Joining of Materials. — 1989. — 1, № 3. — P. 1–3.
8. Erdmann-Jesnitzer F., Louis H. Flüssigkeitsschlagstrahlen mit hoher Geschwindigkeit zur Oberflächenbehandlung // Maschinerie Markt (Würzburg). — 1976. — 82, № 98. — P. 1902–1904.
9. Erdmann-Jesnitzer F., Louis H., Wiedemeier J. Punktschweißen dünner Metallfolien mit dem Flüssigkeitsschlagverfahren // Ibid. — 1977. — № 85. — P. 1907–1909.
10. Erdmann-Jesnitzer F., Louis H., Wiedemeier J. Untersuchungen zum Aufschweißen von Metallfolien durch Flüssigkeitsschlag // Metall. — 1978. — 32, № 8. — S. 794–798.
11. Turgutlu A., Al-Hassani S.T.S., Akyurt M. Impact welding of foils by water jets // Welding J. — 1996. — № 11. — P. 41–45.
12. Pat. 3409975 USA, cl. 29-470.1. Welding by high energy stress front / R. F. Rolsten, D. Onlo, H.H. Hunt, M. La Calif. — Publ. 12.11.68.
13. Botros K. K., Groves T. K. Fundamental impact-welding parameters — an experimental investigation using a 76-mm powder cannon // J. Appl. Phys. — 1980. — 51, № 7. — P. 3706–3714.
14. Botros K. K., Groves T. K. Characteristics of the wavy interface and the mechanism of its formation in high-velocity impact welding // Ibid. — 1980. — 51, № 7. — P. 3715–3721.

State-of-the-art in commercial technologies for explosion (using explosives as energy sources) and high-velocity impact (using pneumatic and powder channel devices, as well as high-velocity water jets as energy sources-welding) is analysed. Separate consideration is given to attempts to build a hand tool for local (spot) high-velocity impact welding. Possible trends in development and upgrading of explosion and high-velocity impact welding technologies are considered.

Поступила в редакцию 12.05.2004

ОБОРУДОВАНИЕ ОАО «КЗЭСО» ДЛЯ ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Я. И. МИКИТИН, В. И. ОКУЛ, С. В. ДУХ, инженеры (Каховский з-д электросварочного оборудования),
В. М. ИЛЮШЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено современное оборудование для дуговой и электрошлаковой сварки и его технологические возможности. Приведены сведения о технических параметрах серийно выпускаемого оборудования и сварочно-технологических свойствах источников питания.

Ключевые слова: сварочное оборудование, механизированные аппараты (полуавтоматы), автоматы, выпрямители, технические характеристики, технологические свойства

Каховский завод электросварочного оборудования (КЗЭСО) — крупнейшая в Украине и СНГ производственная и инжиниринговая компания, традиционно специализирующаяся на проектировании, изготовлении, комплексной поставке и сервисном обслуживании современного электросварочного оборудования. Продукция КЗЭСО поставляется более чем в 75 стран мира и во все страны СНГ. Стабильный коллектив завода численностью более 2300 сотрудников имеет большой производственный опыт и высокий профессионализм. Здесь изготавливаются самые сложные сварочные машины с гарантированным качеством. Так, ОАО «КЗЭСО» является мировым лидером по производству оборудования для контактной стыковой сварки рельсов и труб, в которых воплощены лучшие мировые достижения и которые значительно превосходят зарубежные аналоги.

Завод располагает широким набором технологий для изготовления любых деталей электросварочного оборудования — точное литье по вып-

лавляемым моделям, пластмассовое прессование и литье, механическая обработка сложных деталей на специализированных центрах и электроэрозионных станках. Для изделий шкафного типа имеется комплекс оборудования для точной штамповки и гибки. Сегодня в номенклатуре завода более 60 наименований изделий: сварочные механизированные аппараты (полуавтоматы для дуговой сварки), автоматы для дуговой и электрошлаковой сварки, выпрямители для механизированной и ручной сварки, машины для контактной точечной, шовной и стыковой сварки, а также товары народного потребления. В рамках данной статьи рассмотрим механизированные аппараты для дуговой сварки и автоматы для дуговой и электрошлаковой сварки.

Механизированные аппараты для дуговой сварки. Аппараты ПДГ 508М, ПДГ 508-1 и ПДГ 516М (табл. 1) с широким диапазоном регулирования рабочих параметров предназначены для сварки плавящимся электродом в защитных газах проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой низкоуглеродистых и низколегированных сталей. При применении смесей на основе аргона они также используются для сварки легированных сталей. Аппараты, укомплектованные устройствами для импульсной сварки, используются при вы-

Таблица 1. Техническая характеристика серийных сварочных механизированных аппаратов

Показатель	ПДГ 508М	ПДГ 508М-1	ПДГ 516М	ПДГ 603	ПДФ 502
Номинальный сварочный ток при ПВ=60 % и цикле сварки 10 мин, А	500	500	500	500	500
Пределы регулирования сварочного тока, А	60... 500	60... 500	50... 500	50... 500	150... 500
Пределы регулирования напряжения на дуге, В	18...50	18...50	18...50	18...50	20...45
Диаметр электродной проволоки, мм:					
сплошной	1,2... 2,0	1,2... 2,0	1,2... 2,0	1,2... 2,5	1,6...2,5
порошковой	1,2... 2,0	1,2... 2,0	1,2... 2,0	2,0...3,0	2,0...3,0
Пределы регулирования скорости подачи проволоки, м/ч	120... 1200	140... 730	100... 1200	98... 1012	120... 750
Регулирование скорости подачи электродной проволоки	Ступенчатое	Ступенчатое	Плавное	Плавное	Плавное
Охлаждение горелки	Естественное	Естественное	Естественное	Водяное естественное	Естественное
Источник питания	КИУ 501	КИО 501	КИО 501	КИО 501	КИО 501
Масса, кг:					
механизма подачи проволоки	24	21	17	18	20
источника питания	275	275	275	275	275



Таблица 2. Техническая характеристика малогабаритных сварочных механизированных аппаратов

Показатель	КП 002	КП 004		КП 016	КП 016-1
Номинальный сварочный ток, А	140	315	500	315	315
Пределы регулирования сварочного тока, А	30...140	50...315	60...500	50...315	50...315
Регулирование напряжения на дуге, В	Ступенчатое (8 ступ.)	Плавное		Плавное	Плавное
Пределы регулирования напряжения на дуге, В	16...22	18...38	18...50	18...38	18...38
Диаметр электродной проволоки, мм:					
сплошной	0,6...1,2	0,8...1,4	1,2...2,0	0,8...1,4	0,8...1,6
порошковой	—	—	1,2...2,0	0,8...1,4	0,8...1,6
Пределы регулирования скорости подачи проволоки, м/ч	50...400	80...800		124...1240	100...1100
Источник питания	—	КИУ 501		КИУ 301	КИУ 301
Масса, кг:					
устройства подающего	—	16		9	10
электродной проволоки	12	12		5	5
источника питания, всего	75	275		205	205

полнении швов в различных пространственных положениях.

В конструкции механизированного аппарата ПДГ 603 (табл. 1) для отвода тепла при сварке на повышенных режимах предусмотрено водяное охлаждение горелки, а также переносной пульт управления, обеспечивающий переключение двух заранее установленных режимов сварки и их плавную настройку. Активная потребляемая мощность аппарата из сети с учетом ПВ зависит от источника питания: 8,7 (КИУ 301), 18 (КИУ 501), 9,6 (КИГ 401), 22,6 кВт (КИГ 603).

Специализированный аппарат ПДФ 502 (табл. 1) предназначен для сварки под флюсом ванном методом арматуры железобетонных конструкций стальной проволокой сплошного сечения и порошковой самозащитной проволокой. Схема управления предусматривает работу в режиме обычного механизированного аппарата, а также имеет возможность в течение цикла сварки включать последовательно первый, второй и третий режимы непосредственно с рабочего места сварщика.

Кроме перечисленных выше пяти серийных сварочных механизированных аппаратов, на заводе в последние годы разработано четыре малогабаритных аппарата типа КП 002; КП 004; КП 016 и КП 016-1 (табл. 2). Аппарат КП 002 представляет собой единый блок механизма подачи проволоки с источником питания. Для перемещения он снабжен

колесами и имеет площадку для баллона. В отличие от других аппаратов у КП 002 номинальное напряжение питающей сети однофазного переменного тока 220 В. Пределы регулирования сварочного тока у КП 002 — 30...140 А, скорость подачи электродной проволоки — 50...400 м/ч.

Регулирование скорости подачи электродной проволоки у всех аппаратов КП плавное. В аппарате КП 016 схема управления предусматривает возможность переключения двух заранее установленных режимов сварки непосредственно с рабочего места. Аппарат КП 016-1 (рис. 1) оснащен микропроцессорной системой управления с цифровой индикацией скорости подачи проволоки. В конструкции аппарата предусмотрено подключение горелки с евразъемом. Такие же особенности характерны для нового поколения аппаратов КП 009 и КП 010, нашедших широкое применение в автомобильной промышленности России и Украины.

Совместно с немецкой фирмой «GLOS» КЗЭСО освоил производство трех новых типов сварочных механизированных аппаратов GLC 356-C, GLC 451-C (рис. 2) и GLC 456-C. Они снабжены механизмом подачи проволоки СК 68-C со ступенчатым регулированием сварочного напряжения. Аппараты GLC 356-C и GLC 451-C имеют синергетическую систему управления. При выборе любой комбинации параметров режимов сварки, материала, диаметра проволоки и защитной среды система управления автоматически устанавливает скорость подачи электродной проволоки. При задании скорости подачи проволоки или толщины свариваемого металла индикаторы на панели управления указывают оптимальное положение ступенчатых переключателей, а также ожидаемый сварочный ток. Система управления позволяет настроить и сохранить десять режимов сварки для различных диаметров проволоки и материалов. Режимы вызываются в любой последовательности, что сокращает время переналадки оборудования.

Отличительными особенностями сварочных механизированных аппаратов совместного производства является расширенный диапазон скорости подачи электродной проволоки (0...1440 м/ч), воз-



Рис. 1. Механизированный аппарат КП 016-1



Рис. 2. Механизированный аппарат GLC 451-C

возможность плавного ее регулирования, а также широкий диапазон изменения диаметра электродной проволоки (0,8...2,0 мм).

Сварочные выпрямители. Требования комплектной поставки оборудования для механизированной сварки обусловили необходимость разработки и изготовления в ОАО «КЗЭСО» гаммы источников сварочного тока, работающих в диапазоне 50...1250 А.

Сварочный выпрямитель ГАРТ 160 типа КИ 001 предназначен для ручной дуговой сварки и резки низкоуглеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов. Сварка производится постоянным током покрытыми электродами на токе прямой и обратной полярности. Применяется в промышленном производстве и сельском хозяйстве, на станциях техобслуживания и в быту. Выпрямитель имеет систему, облегчающую зажигание дуги и бесступенчатое регулирование сварочного тока. Техническая характеристика: номинальный сварочный ток 125 А при ПВ = 20 % и цикле сварки 5 мин; пределы регулирования тока 20...160 А; пределы регулирования рабочего напряжения 21...26 В; диаметр электродов 1,5...4,0; масса 45 кг; габаритные размеры 450×235×360 мм.

В настоящее время у отечественного потребителя спросом в основном пользуются тиристорные источники питания, что обусловлено простотой и его относительно низкой стоимостью, высокой надежностью и ремонтоспособностью.

Универсальные сварочные выпрямители (табл. 3) КИУ 301, КИУ 501 (рис. 3) и КИУ 1201 предназначены для механизированной и автоматической дуговой сварки в защитных газах, под флюсом и штучными электродами всех типов.

Сварочные тиристорные выпрямители КИГ 401 (50...400 А) и КИГ 601 (60...630 А) служат преимущественно для механизированной дуговой сварки в защитных газах. Ступенчатое переключение сварочного напряжения позволяет перекры-



Рис. 3. Сварочный выпрямитель КИУ 501

вать широкий диапазон сварочных токов без применения сложных электронных устройств. Специальная схема выпрямления обеспечивает сварочный ток с очень малым коэффициентом пульсации. Оба выпрямителя просты в эксплуатации и надежны в работе.

Многочисленные эксперименты по улучшению сварочных свойств тиристорных источников питания заканчивались подбором оптимальных параметров дросселя и отдельных коэффициентов усиления в звеньях структурной схемы. Принималось во внимание, что при стабильном процессе сварки на малых токах, как правило, получали хорошие сварочные свойства во всем диапазоне токов. Наиболее кардинальной мерой по улучшению сварочных свойств источника питания является обеспечение в нем снижения скорости нарастания тока в капле электродного металла. С этой целью рекомендовано увеличение индуктивности дросселя до 1,0...1,4 мГн и введение производной от сварочного тока в закон управления углом проводимости тиристорной группы. Применение производной от сварочного тока di/dt (D-компоненты) в схему управления источников питания позволяет получать оптимальные рабочие параметры и высокую стабильность процесса сварки.

Технологические свойства сварочных механизированных аппаратов и выпрямителей. Описанное выше сварочное оборудование прошло производственные испытания на ведущих предприятиях машиностроительной и судостроительной от-

Таблица 3. Технические характеристики выпрямителей

Марка выпрямителя	Пределы регулирования тока, А	ПВ, %	Масса, кг
КИУ 301	50...315	60	205
КИУ 501	50...500	60	275
КИУ 1201	200...1250	100	550



раслей. Комплексное исследование сварочно-технологических свойств механизированных аппаратов и автоматов проведено в ИЭС им. Е. О. Патона* в соответствии с ГОСТ 25616-83. Оценены следующие показатели сварочных аппаратов и соответствующих источников питания: надежность установления процесса сварки; потери металла на разбрызгивание и угар; качество формирования швов.

Электрические параметры режимов сварки в углекислом газе и смеси $Ar + 20\% CO_2$ регистрировали с помощью контрольно-тренажера, обеспечивающего текущую цифровую индексацию значений напряжения на дуге и тока сварки, а также изменение усредненных значений длительности замыканий дугового промежутка. Надежность установления процесса сварки определяли по количеству первоначальных замыканий дугового промежутка или обрывов дуги, происходящих с момента первого соприкосновения проволоки с образцом, до установления стабильного процесса. Для определения технологических свойств выбрано восемь наиболее характерных режимов сварки металла толщиной 3...16 мм.

Анализ результатов технологических испытаний показал, что оборудование ОАО «КЗЭСО» обеспечивает практически мгновенное зажигание дуги (после одного-двух соприкосновений проволоки с поверхностью образца). По степени снижения потерь металла на разбрызгивание и длительности коротких замыканий это оборудование наиболее эффективно. Швы, выполненные сварочными аппаратами серии КП, характеризуются равномерным формированием, гладкой и мелкочешуйчатой поверхностью и плавными переходами к основному металлу. Важным технологическим преимуществом рассматриваемого сварочного оборудования является достаточно стабильное горение дуги при сварке на малых токах (40...50 А) и применение электродной проволоки повышенного диаметра. ОАО «КЗЭСО» с 1997 г. наладило про-

изводство сварочных выпрямителей с номинальным током 500 А. В настоящее время освоен промышленный выпуск выпрямителей на 315 А (КИУ 301) и 1200 А (КИУ 1201). Последний может применяться как многопостовой источник при комплектации балластными реостатами.

Одной из новых разработок, выполненных ОАО «КЗЭСО» совместно с ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона, является многоцелевой универсальный выпрямитель КИУ 701 с оригинальными техническими решениями по силовой части и системе управления и регулирования. Характерно, что данный источник имеет повышенное напряжение холостого хода, а также возможность плавного нарастания силы тока в процессе сварки.

Автоматы для дуговой сварки. Автоматы А 1406, А 1412 и А 1416 (табл. 4) предназначены для дуговой сварки и наплавки низкоуглеродистых и легированных сталей. Автомат А 1406 устанавливается на наплавочные станки и обеспечивает наплавку в защитном газе, открытой дугой порошковой проволокой и лентой, под флюсом, открытой дугой расщепленным электродом. Подвесной самоходный автомат А 1416-1 (рис. 4) блочно-модульной конструкции с лазерной системой слежения за стыком предназначен для сварки под флюсом длинномерных прямолинейных швов из низкоуглеродистых и легированных сталей. Как правило, сварка производится постоянным током с независимыми от параметров дуги скоростями подачи электродной проволоки и скоростями сварки. Автомат построен на современной элементной базе с использованием узлов и компонентов ведущих европейских производителей. Управление автоматом осуществляется с помощью контроллера производства фирмы «Siemens». Задание параметров и контроль работы механизмов производится как с пульта управления, установленного на сварочной головке, так и с пульта, расположенного в шкафу управления.

В ручном или автоматическом режиме позиционирование мундштука на стык листов производится с помощью световых точек от лучей датчиков слежения. Зазор между листами при сварке без разделки кромок должен быть 1,5...2 мм.

Автоматы КА 001 и КА 002 тракторного типа предназначены для дуговой сварки стыковых соединений под флюсом с разделкой и без разделки кромок. Количество электродов 1; диаметр электродной проволоки 3...5 мм; пределы регулирования сварочного тока 250...1000 А; пределы регулирования скорости подачи электродной проволоки 49...404 м/ч (КА 001) и 30...300 м/ч (КА 002). Оба автомата комплектуются источником питания КИУ 1201.

Подвесной самоходный автомат АД 231 применяется для широкого круга наплавочных работ на токах 250...1250 А. Количество электродов 1; диаметр проволоки 4...6 мм; скорость подачи проволоки 46...460 м/ч.

Автоматы для электрошлаковой сварки. Для электрошлаковой сварки выпускаются автоматы

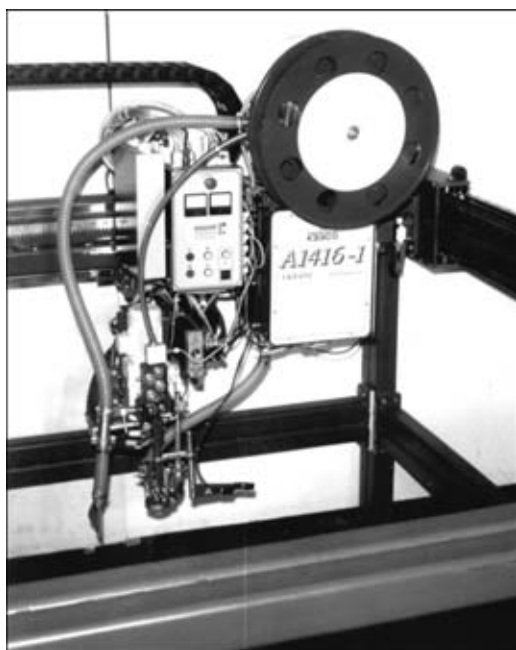


Рис. 4. Самоходный автомат А 1416-1

* Исследования выполнены под руководством д-ра техн. наук Н. М. Воропая.

Таблица 4. Техническая характеристика сварочных автоматов

Показатель	А 1406		А 1412	А 1416	
	500 А	1250 А		500 А	1250 А
Номинальный сварочный ток, А, при:					
ПВ = 60 %	500		1250×2	500	
ПВ = 100 %	1250			1250	
Пределы регулирования сварочного тока, А	60...500	250...1250	250...1250	60...500	250...1250
Количество электродов, шт.	1		2	1	
Диаметр электродной проволоки, мм	1,2...2	2...5	3...6	1,2...2	2...5
Пределы регулирования скорости подачи электродной проволоки, м/ч:	17...553				
1-й диапазон			15...149	47...509	
2-й диапазон			58...583	Ступенчатое	
Пределы регулирования скорости сварки, м/ч:					
1-й диапазон	—		12...60	12...120	
2-й диапазон	—		50...250	Ступенчатое	
Источник питания	КИУ 501	КИУ 1201	КИУ 1201×2	КИУ 501	КИУ 1201
Масса, кг:					
сварочной головки	185		400	320	
источника питания	275	550	550	275	550

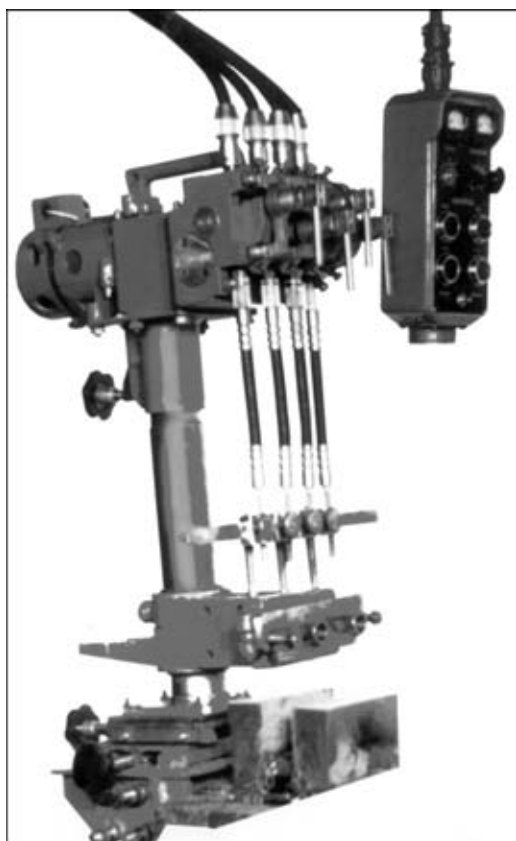


Рис. 5. Автомат для электрошлаковой сварки А 1304

А 1304 (рис. 5) и А 535. Автомат А 1304 предназначен для электрошлаковой сварки плавящимся электродом изделий из стали и алюминия и его сплавов. Номинальный сварочный ток при ПВ = 100 % составляет 3000 А (А 1304); 6000 А (А 1304-03); 9000 А (А 1304-06). Количество проволок для последних трех автоматов 4; диаметр проволок для А 1304 3 мм; для А 1304-03 3 и 5 мм и для А 1304-06 3, 5 и 6 мм. Все три автомата А 1304 комплектуются сварочными трансформаторами ТРМК-3000-1.

Автомат А 535 предназначен для односторонней электрошлаковой сварки с двухсторонним формированием шва сталей толщиной до 450 мм. Он позволяет осуществлять сварку продольных и кольцевых стыковых швов, угловых и тавровых соединений. Номинальный сварочный ток при ПВ = 80 % 1000 А; при 100 % — 900 А. Количество проволок диаметром 3 мм 3 шт. Источник питания — сварочный трансформатор ТШС1000-3.

ОАО «КЗЭСО» имеет замкнутый цикл производства: от литья до сдачи под ключ с выполнением пусконаладочных работ. Передовые технологии, умноженные на мощность технических средств и высококвалифицированный кадровый состав специалистов, — залог успеха предприятия. Нарастание объемов выпуска конкурентоспособной продукции и тесное сотрудничество с ИЭС им. Е. О. Патона позволяет ОАО «КЗЭСО» оптимистично смотреть в будущее.

Advanced equipment for arc and electroslag welding and its technological capabilities are considered. Information about technical parameters of serially-manufactured equipment and welding-technological properties of power supply sources is given.

Поступила в редакцию 02.07.2004



НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ

В. Л. НАЙДА, А. А. МОЗЖУХИН, О. Ф. ЛОБАНОВ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны установки нового поколения для автоматического ультразвукового контроля сварных труб, выполненные на современных элементных базах механики и электроники. С помощью установок осуществляют контроль сварных швов и концевых участков труб диаметром 508...1420 мм и толщиной стенки 7...50 мм.

Ключевые слова: сварные трубы, массовое производство, неразрушающий контроль, автоматизированный ультразвуковой контроль, установки, металл шва

В современном мире постоянно возрастают требования к сварным трубам, применяемым при строительстве магистральных трубопроводов, в частности к их эксплуатационной надежности. В борьбе за рынки сбыта трубные заводы, несмотря на большие затраты, вынуждены использовать самые современные средства автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК), чтобы обеспечить надежное обнаружение возможных дефектов в сварных швах и концевых участках труб и тем самым гарантировать высокое качество выпускаемой продукции.

ОАО «Выксунский металлургический завод» («ВМЗ»), имеющее опыт многолетнего сотрудничества с ИЭС им. Е. О. Патона, одной из своих приоритетных задач считает освоение выпуска труб для магистральных трубопроводов, соответствующих требованиям Американского нефтяного института. Решение же поставленной задачи невозможно без применения современного оборудования для АУЗК сварных швов и концевых участков труб как одного из составляющих, обеспечивающих требования стандарта API Spec Q1.

В октябре 2003 г. ОАО «ВМЗ» пригласило ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона принять участие в тендере на поставку следующего оборудования:

двух установок для АУЗК концевых участков труб диаметром 508...1067 мм толщиной стенки 7...34 мм;

установки для АУЗК продольных сварных швов труб диаметром 508...1420 мм толщиной стенки 7...50 мм;

трех установок для АУЗК продольных сварных швов труб диаметром 508...1067 мм.

Несмотря на предельно сжатые сроки поставки оборудования, было решено принять участие в тендере совместно с давним партнером НИИНК «Интроскоп» (Республика Молдова) — поставщиком многоканальной ультразвуковой (УЗ) аппаратуры.

Условия тендера были на редкость жесткими. По требованию заказчика заявки на участие в нем должны были содержать подробное описание конфигурации системы контроля, эскизный проект создаваемого оборудования, схемы прозвучивания, описание уровня автоматизации, основные технические характеристики акустической части.

Кроме того, требовалась базовая информация о предполагаемом поставщике оборудования, включающая сведения об основных видах произведенной ранее продукции по АУЗК (табл. 1); список потребителей этой продукции (табл. 2); опыт работы с ОАО «ВМЗ».

Как видно из таблиц, у сотрудников ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона имелся достаточный опыт работ в этом направлении. Для ОАО «ВМЗ» был создан

Таблица 1. Основные виды производимой продукции в последние годы по УЗ и вихретоковому контролю (ВТК)

Вид продукции	Основные модификации и характеристики
НК 106	8 УЗ каналов, контроль прямых сварных швов труб 530...1420, масса 800 кг
НК 147	4 УЗ канала, контроль биметалла деталей ракет, масса 350 кг
НК 148	4 УЗ канала, контроль сварных швов ракетной техники, масса 450 кг
НК 164	8 УЗ каналов, контроль сварных швов корпусов ракет, масса 300 кг
НК 193	8 УЗ каналов, контроль сварных швов трубопроводов АЭС, масса сканера 30 кг
НК 300	4 УЗ канала, контроль сварных швов топливных каналов РБМК-1000, масса 150 кг
НК 310	8 УЗ каналов, контроль кольцевых швов магистральных трубопроводов, масса 250 кг (экспериментальный образец)
НК 321	8 УЗ каналов, контроль кольцевых сварных швов трубопроводов АЭС, масса сканера 15 кг
НК 331	ВТК перемычек коллекторов парогенераторов АЭС, масса 50 кг

Таблица 2. Основные потребители продукции

Вид продукции	Потребители
НК 147, НК 148, НК 164, АУЗК	«Южмашзавод» Днепропетровск
НК 193, НК 300, НК 321, НК 331	Чернобыльская АЭС, Запорожская АЭС
НК 310, АУЗК магистральных трубопроводов (экспериментальный образец)	НЭК «Укртрансгаз»
НК 106 УЗК сварных швов труб	Харьковский трубный завод

комплекс НК 180 для АУЗК (6 установок), поставленный в 1989–1990 гг.

Тендер проводили в два этапа. На первом (заочном) проанализировали все присланные заявки по следующим основным критериям:

соответствие характеристик предлагаемой продукции техническим требованиям ОАО «ВМЗ»; экономическая эффективность продукции (соотношение цена/качество);

ценовые характеристики и привлекательность условий оплаты;

репутация фирмы.

По результатам анализа заявок к участию во втором (очном) этапе тендера были приглашены предприятие «Алест» (г. Москва); ЗАО «Конс-

трукция» (г. Москва); ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона (Украина) совместно с НИИНК (Республика Молдова); KARL DEUTSCH (Германия); ScanMaster Systems (Израиль); INDURO Krautkramer — представитель AGFA NDT GmbH (GE Inspection Technologies GmbH/Германия).

Во время проведения второго этапа были заслушаны сообщения представителей, участвовавших в тендере организаций. По итогам заседания тендерного комитета ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона признано основным поставщиком оборудования и с ним был подписан контракт на поставку шести установок АУЗК.

Первая установка НК 362 для АУЗК концевых участков труб диаметром 508...1067 мм (рис. 1)

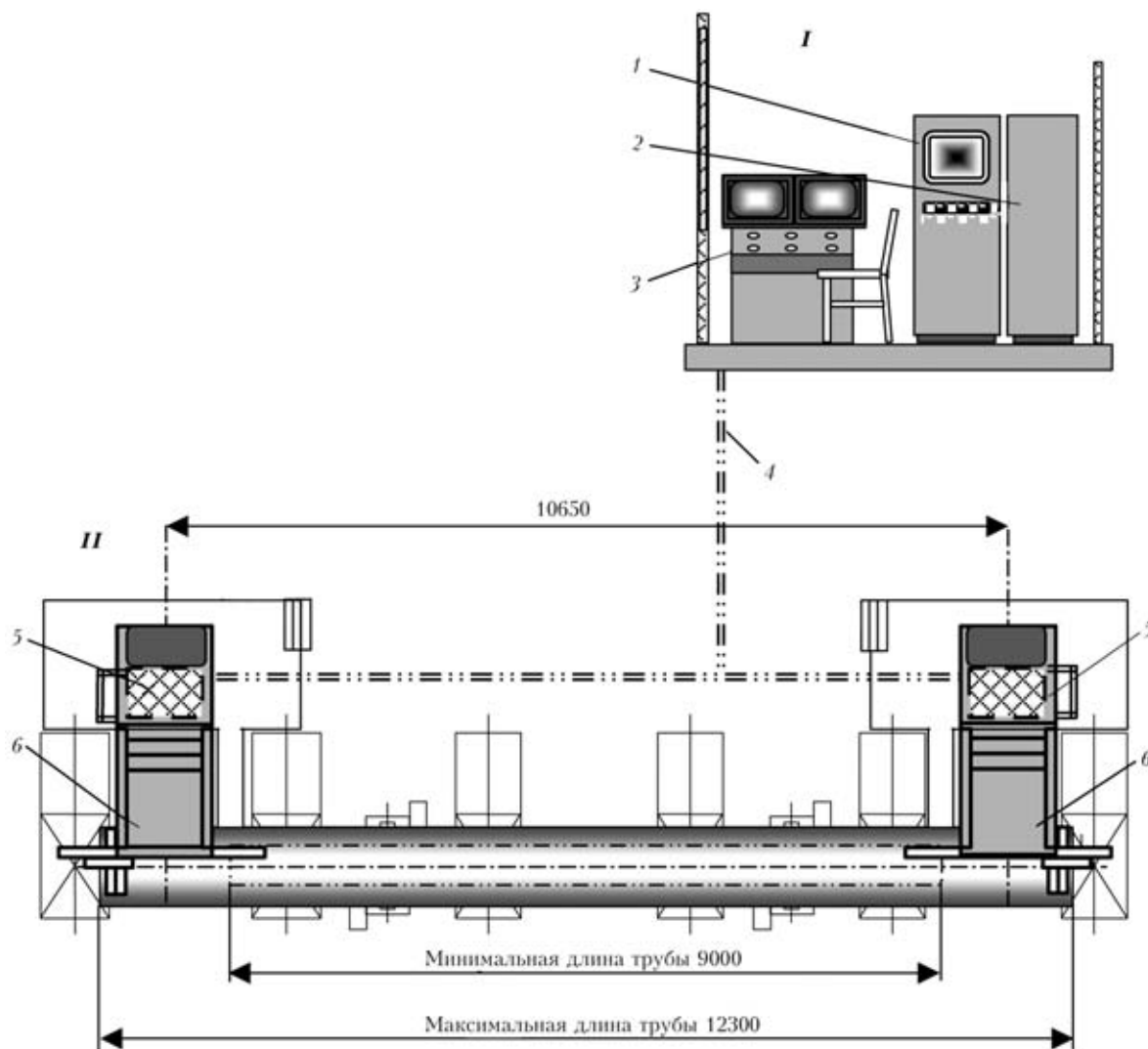


Рис. 1. Схема установки НК 362 для АУЗК концевых участков труб диаметром 508...1067 мм: I — кабина оператора дистанционного управления; II — размещение установки на рольганге (вид в плане); 1 — многоканальный УЗ дефектоскоп; 2 — шкаф управления; 3 — пульт управления с телемониторами; 4 — кабельные связи; 5 — силовой шкаф управления; 6 — агрегаты АУЗК концевых участков труб с акустическими головками



уже прошла функциональные испытания в присутствии представителя заказчика. Еще две установки, в том числе НК 360 для АУЗК продольных сварных швов труб диаметром 508...1420 мм толщиной стенки 7...450 мм (рис. 2) находятся в стадии сборки.

Жесткие требования по перенастройке при переходе на контроль труб другого типоразмера (время перенастройки и установления рабочего режима не должно превышать соответственно 30 и 10 мин), а также требования по надежности системы АУЗК определили архитектуру системы управления установками. Система управления реализована на программируемом контроллере «Siemens» Simatic S7-300 с двумя распределенными станциями ET-200m. Управление установками осуществляется по сети PROFIBUS-DP, ручное управление — с программируемых пультов фирмы «Siemens» OP-17. На всех установках применены серводвигатели комплектных приводов фирмы «Rexroth Bosch». Интерфейс блоков управления выполняют приводами PROFIBUS-DP. Обе установки (НК 360 и НК 362) сконструированы по модульному принципу и состоят из аналогичных узлов.

Базовой сборочной единицей установок, обеспечивающей подачу акустических блоков на позицию контроля, является несущий модуль вертикального перемещения, жесткость конструкции которого служит обеспечению стабильности и повторяемости результатов УЗ контроля. На несущем модуле смонтированы модули горизонтального пе-

ремещения. Установка НК 360 включает систему лазерного слежения за валиком усиления сварного шва на базе промышленного компьютера, разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона. На модулях горизонтального перемещения смонтированы акустические блоки с УЗ головками, каждая из которых имеет свой пневматический привод подъема и опускания, обеспечивающий надежный прижим к поверхности трубы. Кроме того, на модулях горизонтального перемещения установлены ручные приводы для регулировки расстояния между УЗ головками при настройке. Установки укомплектованы датчиками пути (НК 360 — продольного перемещения, НК 362 — вращения трубы), краскоотметчиками дефектов, устройством смачивания. Для каждого краскоотметчика используют внешнюю индивидуальную емкость с краской, находящуюся под давлением. Обнаружение дефектов, обработку данных контроля, регистрацию результатов калибровки обеспечивает многоканальный УЗ дефектоскоп, поставляемый НИИНК «Интероскоп» (Республика Молдова).

Управление всеми компонентами установок осуществляется контроллером «Simatic S7-300», а многоканальный дефектоскоп управляется своим технологическим компьютером. Преобразование сигналов и их запись в буферную память АЦП осуществляется согласно программно установленным временным stroбам. В результате анализа и обработки сигналов, накопленных в памяти АЦП, производится идентификация дефектов, вычисление их параметров

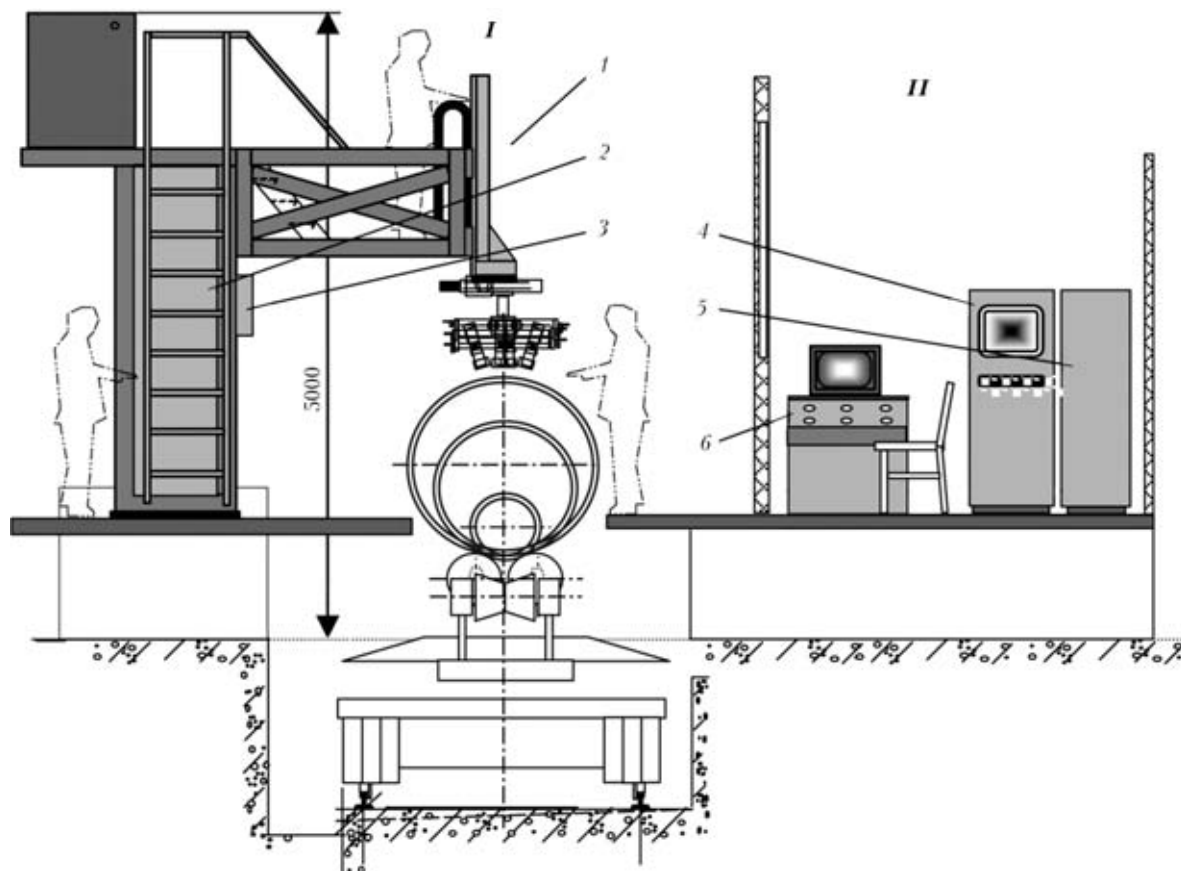


Рис. 2. Схема установки НК 360 для АУЗК сварных швов труб диаметром 508...1420 мм: I — размещение установки на линии контроля (вид сбоку); II — кабина оператора; 1 — технологический агрегат АУЗК; 2 — шкаф силовой; 3 — пульт настройки режимов; 4 — многоканальный УЗ дефектоскоп; 5 — шкаф управления; 6 — пульт управления с телемонитором

и координат. На основе полученной информации выполняется регистрация дефектов и вывод их параметров на экран монитора.

Цикл контроля отображается на экране монитора, что позволяет оператору фиксировать текущие результаты выполненного контроля с возможностью вывода на экран А-развертки по одному из рабочих каналов. Результатом АУЗК является файл дефектов, помещаемый в базу данных, и протокол контроля, выводимый на печать. Имеется интерфейс для обмена информацией с АСУ ТП цеха.

Разработанная в установках система АУЗК позволяет:

программировать и запоминать параметры режимов работы и настройки чувствительности, быстро изменять программу управления (скорость, путь), а также параметры настройки;

реализовывать различные акустические схемы и контролировать акустический контакт;

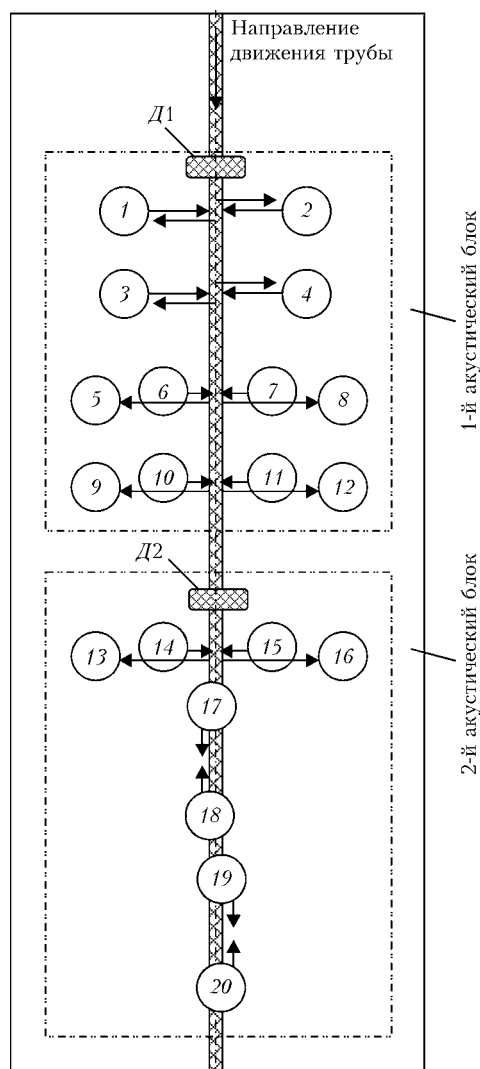


Рис. 3. Схема расположения ПЭП для контроля продольных сварных соединений труб диаметром 508... 1420 мм и толщиной стенки 7... 50 мм: D1 и D2 — лазерные датчики слежения за валиком усиления сварного шва; 1-4 — группа наклонных УЗ преобразователей; 5-16 — УЗ преобразователи, работающие в тандемных схемах; 17-20 — УЗ преобразователи, стоящие на сварном шве и работающие в иммерсионном варианте на обнаружение поперечных дефектов

осуществлять сбор и обработку данных без участия оператора УЗ контроля, чем обеспечивается объективность результатов контроля;

контролировать УЗ параметры и работу механизмов по выводимым на экран дисплея данным.

Основные технические характеристики установки НК 362 для АУЗК концевых участков труб

диаметром 508... 1067 мм толщиной стенок 7... 34 мм

Рабочая частота, МГц	2,5; 4,0
Линейная скорость контроля, м/мин, макс.	20
Диапазон регулирования скорости, не менее	1... 100
Количество УЗ каналов, шт.	20
Запас чувствительности по каналам в динамическом режиме, дБ, не хуже	12
Неконтролируемая зона в районе сварного шва, мм, не более	15
Неконтролируемая зона на концах труб, мм, не более	10
Регулировка акустического зазора, мм	0... 5
Расход воды, л/мин, не более	50
Потребляемая мощность, кВт·А, не более	8

Установка обеспечивает за один оборот трубы прозвучивание по всему периметру концов труб по всей толщине стенки, выявление дефектов типа расслоение на ширине 60 мм от торца и продольно ориентированных дефектов типа трещина на ширине 30 мм от торца; автоматический контроль качества акустического контакта по всем дефектоскопическим каналам.

Установка обеспечивает производительность контроля концевых участков труб не менее 25 труб в час.

Чувствительность системы достаточна для автоматического обнаружения следующих дефектов:

типа расслоения, амплитуда эхо-сигнала от которого равна или превышает эхо-сигналы от искусственного отражателя в виде сверления с плоским дном диаметром 5,0 мм;

типа продольной трещины, амплитуда эхо-сигнала от которой равна или превышает эхо-сигналы от искусственных отражателей в виде прямоугольных продольных пазов шириной 1 мм протяженностью 50 мм и глубиной 5 % толщины стенки, нанесенных на наружной и внутренней поверхностях труб.

Основные технические характеристики установки НК 360 для АУЗК продольных сварных швов труб

диаметром 508... 1420 мм толщиной стенок 7... 50 мм

Рабочая частота, МГц	2,5; 4,0
Скорость контроля, м/мин, макс.	30
Диапазон регулирования скорости, не менее	1... 100
Количество УЗ каналов, шт.	24
Частота следования зондирующих импульсов, по каждому каналу, обеспечивающая посылку импульсов на 1 мм длины шва, не менее	2
Запас чувствительности по каналам в динамическом режиме, дБ, не хуже	12
Неконтролируемая зона на концах труб, мм, не более	30
Точность слежения за валиком усиления сварного шва в горизонтальной плоскости, мм	±0,5
Регулировка акустического зазора, мм	0... 5
Расход воды, л/мин, не более	50
Потребляемая мощность, кВт·А, не более	8

Установка обеспечивает прозвучивание сварного шва по всей толщине стенки труб с обеих сторон шва, выявление различно ориентированных (про-



дольных, поперечных и пр.) дефектов; автоматический контроль качества акустического контакта по всем дефектоскопическим каналам.

Чувствительность системы достаточна для автоматического обнаружения дефектов сварного шва, амплитуда эхо-сигналов от которых равна или превышает эхо-сигналы от искусственных отражателей в виде прямоугольного паза шириной 1 мм протяженностью 50 мм и глубиной 5 % толщины стенки труб, сквозного отверстия в шве диаметром 1,6 мм, прямоугольного паза, выполненного поперек шва, глубиной 5 % толщины стенки труб.

Временная нестабильность установки по каждому каналу не должна превышать 2 дБ за 8 ч непрерывной работы.

На рис. 3 показан вариант схемы акустического контроля и расположения пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) при реализации процесса АУЗК сварных швов.

Количество работающих тандемных блоков зависит от толщины стенки. При толщине стенки 50 мм работают все тандемные схемы. Контроль осуществляется в иммерсионном варианте.

Такое решение заменяет Х- и К-образные схемы и превалирует сегодня в зарубежных установках для контроля.

Для всех установок предусмотрено следующее: нанесение на поверхность трубы отметок разного цвета, определяющих тип и местоположение

дефектов, а также участков с неудовлетворительным акустическим контактом;

на каждую трубу выдается протокол контроля, включающий как минимум номер трубы, амплитуды эхо-сигналов обнаруженных дефектов с указанием их координат, протяженности, номера канала, обнаружившего дефект;

при фиксировании результатов контроля регистрируется дефектограмма каждого канала с возможностью просмотра или печати информации по всем или части каналов на бумажном носителе;

калибровку проводят на стандартных образцах предприятия — имитаторах дефектов как в статическом, так и динамическом режиме при скорости их перемещения, близкой к скорости перемещения (вращения) труб в процессе контроля. Результаты калибровки протоколируются;

установка обеспечивает передачу информации о результатах контроля в систему АСУ ТП цеха посредством локальной сети.

В ближайшем будущем эксплуатация установок НК 362, НК 360 на ОАО «ВМЗ» покажет, насколько были оправданы наши амбиции по созданию современного оборудования АУЗК труб в условиях их массового производства. Мы надеемся на положительный результат и готовы к сотрудничеству с трубными заводами Украины и других стран.

Units of the new generation for automatic ultrasonic testing, designed using sophisticated elements of mechanics and electronics, are presented. Units can control welds and conic areas of pipes of diameter from 508 to 1420 mm and thickness from 7 to 50 mm.

Поступила в редакцию 28.07.2004

3-6 НОЯБРЯ Москва, Экспоцентр на Красной Пресне павильон "Форум" 2004	при поддержке Министерства экономического развития и торговли РФ Russian Federation ministry of economic development and trade Российского научно-технического сварочного общества (РНТСО) / Russian Welding society (RWS) ЭКСПО СВАРКА экспосварка ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА THE 5th INTERNATIONAL SPECIALIZED EXHIBITION		
ОРГАНИЗАТОРЫ: M.S.I., ООО "Мессе Сервис" Российское Научное Техническое сварочное общество	ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:	◆ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ ◆ МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ◆ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ◆ СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАЙКИ ◆ АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ РАБОТ ◆ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА ◆ СПЕЦОДЕЖДА И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ СВАРЩИКОВ ◆ СЕРТИФИКАЦИЯ	ORGANIZERS: M.S.I., "Messe Servis" The Russian Scientific Technical welding society Тел.: +7(095) 105-6561/62 Факс: +7(095) 248-0734
welding@msiexpo.ru	 www.msiexpo.ru	Информационный спонсор выставки:  Информационная поддержка:  СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ	

СОТРУДНИЧЕСТВО НКМЗ И ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ В ТЯЖЕЛОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

С. Г. КРАСИЛЬНИКОВ, В. П. ГУЛИДА, инженеры (ЗАО «НКМЗ», г. Краматорск, Украина)
академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО, И. И. ЛЫЧКО**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены сведения о результатах многолетнего сотрудничества ЗАО «НКМЗ» с ИЭС им. Е. О. Патона в области производства крупных заготовок на основе применения электрошлаковой сварки. Описаны примеры успешного применения ЭШС при производстве ответственного оборудования, конкретных деталей, показаны потенциальные возможности и перспективы дальнейшего совершенствования технологий электрошлаковой сварки в тяжелом машиностроении.

Ключевые слова: конструкционные материалы, электрошлаковая сварка, тяжелое машиностроение, укрупнение заготовок, специализированные установки, сварочная аппаратура

Технический прогресс в тяжелом машиностроении как базовой отрасли промышленности предопределяет возможности ускоренного развития всего машиностроения, металлургии и других важных отраслей промышленности.

В 1960–1980 гг. на НКМЗ решена задача освоения производства сверхкрупных машин и агрегатов, для изготовления которых потребовались новые специальные технологии, обеспечивающие производство уникальных заготовок массой до 300 т. Эта государственная задача решалась заводом на основе принятого перспективного направления — укрупнения заготовок путем изготовления их кованосварными, литосварными из отдельных поковок и отливок сравнительно небольшой массы, а также сварными из проката и комбинированными. Для укрупнения массивных заготовок необходимы были принципиально новые сварочные процессы. Одним из них стала электрошлаковая сварка (ЭШС) — выдающееся отечественное изобретение, созданное в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. ЭШС позволила выполнять неразъемные соединения практически неограниченной толщины за один проход [1]. НКМЗ стал пионером в освоении этого способа. Начиная с 1950 г. совместные работы в этой области не прекращаются и сегодня.

С самого начала все теоретические и экспериментальные работы по созданию ЭШС координировались Б. Е. Патонем. Благодаря труду целой плеяды ученых ИЭС им. Е. О. Патона — Г. З. Волошкевича, Д. А. Дудко, А. М. Макары, Ю. А. Стеренбогена, И. И. Сузук-Слюсаренко, И. И. Лычко и многих других специалистов разработаны основы электрошлакового процесса и выработаны практические рекомендации для широкого внедрения его в производство.

Успех внедрения новых способов ЭШС на НКМЗ был бы немыслим без творческого союза ученых ИЭС им. Е. О. Патона и производственников отдела главного сварщика завода прежде всего И. Г. Гузенко, В. В. Черныха, Г. Г. Мейрамова, В. С. Погорелова, Л. П. Ерегина, В. М. Семенова, А. Е. Малая, А. Д. Панина, В. П. Гулиды, И. С. Савченко и др. Многие из них стали известными учеными и крупными организаторами сварочного производства в тяжелом машиностроении. Неоценимый вклад в освоение и практическую реализацию техники и технологии ЭШС внесли электросварщики-операторы А. И. Имшенецкий, В. Я. Цибуленко, П. Е. Назаренко, Н. Г. Шевченко, А. В. Ярмоленко, В. К. Луговской, В. И. Глущенко, А. С. Корх, В. М. Шурмалев и др.

В результате сотрудничества НКМЗ с ИЭС им. Е. О. Патона впервые в отечественном машиностроении в 1951 г. на заводе применен способ ЭШС проволочными электродами для приварки лопаток к статорам гидротурбин при толщине свариваемых изделий 200 мм. Для этой цели институтом изготовлены специальные двухэлектродные аппараты А-316, которые впоследствии были заменены трехэлектродными А-372.

К 1954 г. освоено изготовление станин механических ковочно-штамповочных прессов усилием 40 МН и валов гидротурбин с применением ЭШС. В дальнейшем ее объемы непрерывно возрастали, были изготовлены станины и цилиндры прессов усилием 750 МН для Куйбышевского металлургического комбината (ныне — металлургическое предприятие ОАО «Объединенная компания «Сибирский алюминий», г. Самара) и Верхнесалдинского металлургического комбината, серия валов гидротурбин для Горьковской, Братской, Асуанской (Египет), Красноярской ГЭС, а также станина пресса 6300. Используемая к тому времени технология и техника ЭШС ограничивала толщину свариваемого металла до 400 мм, не позволяла сваривать детали сложного сечения, что сдерживало ее широкое применение.



С целью расширения диапазона свариваемых толщин совместными усилиями сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона и НКМЗ в 1956 г. был разработан новый способ получения неразъемных соединений металлических заготовок, получивший название ЭШС плавящимся мундштуком [2], который позволял выполнять свариваемые сечения практически неограниченной толщины и протяженности, а также сваривать изделия сложной формы. К разработке этого способа ЭШС подтолкнула необходимость сварки лопаток гидротурбин толщиной более 200 мм, соединяемое сечение которых имело каплевидную форму [3]. Первое практическое использование ЭШС плавящимся мундштуком нашло применение при исправлении дефектов в крупных отливках, которые раньше на заводе шли в брак.

Широкие возможности способа ЭШС [4] привлекли внимание конструкторов и технологов завода, что способствовало нетрадиционным подходам в выборе и разработке новых конструкторско-технологических решений при производстве крупных деталей для машин и агрегатов кузнечно-прессового, прокатного, энергетического и других видов оборудования.

Значительно возросшие объемы ЭШС потребовали создания более совершенного сварочного оборудования для выполнения электрошлаковых соединений. Над созданием сварочных аппаратов для ЭШС, принципиально отличающихся от аппаратов для электродуговой сварки, в институте успешно работали конструкторы под руководством В. Е. Патона. Особо хотелось бы отметить вклад П. И. Севбо, М. Г. Бельфора, Р. И. Лашкевича, В. Б. Смолярко, И. В. Ющенко, В. А. Маслова и др.

Положительный опыт применения ЭШС на НКМЗ позволил ИЭС им. Е. О. Патона спроектировать и изготовить серию аппаратов для сварки проволочными электродами: более совершенный трехэлектродный аппарат А-535 (вместо А-372), малогабаритные аппараты А-433 и А-790. Для сварки плавящимся мундштуком изготовлены шестиэлектродные аппараты А-645 (впервые использованы при ЭШС арка для крупных ковшей экскаваторов и труднодоступных швов траверсы прессы 6300) и 18-электродные аппараты А-741, оснащенные более мощными источниками питания ТШС-3000-3. Для сварки пластинчатыми электродами создан аппарат А-550.

В этот период удалось существенно усовершенствовать технику ЭШС кольцевых швов — путем модернизации установки изготовлен механизированный роликовый стенд, а также сварочный аппарат, снабженный двумя трехэлектродными головками А-1247, позволяющий автоматически производить быструю (10...15 с) замену вышедшей из строя головки на другую (резервную) без нарушения процесса сварки. Для сварки деталей толщиной до 2500 мм спроектирована и изготовлена стационарная установка портального типа, на подъемной траверсе которой размещался сварочный автомат А-741 для ЭШС плавящимся мундштуком. Установка также была оснащена двумя противоположно расположенными балконами, снабженными аппаратами А-372, при этом пло-

щадки с аппаратами выполнены с возможностью перемещения в горизонтальном и вертикальном направлениях и предназначены для обслуживания и визуального контроля процесса при ЭШС изделий плавящимся мундштуком, а также для выполнения в автономном режиме ЭШС проволочными электродами изделий толщиной до 450 мм. Созданные участки ЭШС размещались в цехах, где подъемно-транспортные средства имели ограниченную грузоподъемность. Для этого были организованы рабочие места в других цехах завода, где можно сваривать детали (балки, станины, шаботы, траверсы и др.) большой массой (до 300 т). Для сварки таких деталей спроектированы и изготовлены переносные многоэлектродные подающие механизмы А-480.

Для производства сварных конструкций в основном применяли углеродистые стали марки 30 и 35. Дальнейшее повышение удельной мощности выпускаемого заводом оборудования требовало для производства сварнокованных конструкций освоения ЭШС сталей повышенной прочности [5]. При применении хромникельмолибденовых сталей обнаружена их низкая технологическая прочность, заключающаяся в образовании горячих кристаллизационных трещин в металле шва и околошовной зоне [6, 7]. Для решения задачи повышения технологической прочности в условиях ЭШС совместное сотрудничество было направлено на проведение комплексных исследований, в результате которых установлены факторы, влияющие на склонность к образованию трещин и разработаны технологические меры, позволяющие предотвратить их появление (разработаны и внедрены новые сварочные материалы, методика по оценке свариваемости, разработаны специальные технологические приемы по созданию благоприятных термических циклов и уменьшению сварочных напряжений) [8–11].

Освоение сварки сталей повышенной прочности, совершенствование технологии ЭШС позволили спроектировать и изготовить прессы, молоты и прокатные станы с высокими технико-эксплуатационными качествами. Это прежде всего прессы усилием 300 и 500 МН, бесшаботный молот с энергией удара 1,5 МДж, уникальный пресс усилием 650 МН (изготовленный и поставленный в 1977 г. во Францию [12]), прокатные станы 2000 и 3600. Использование имеющегося в этот период оборудования и технологии ЭШС обеспечивало выпуск изделий с электрошлаковыми соединениями, объем которых достигал в 1970–1980 гг. 10...12 тыс. т/год.

В рамках дальнейшего совершенствования оборудования и технологии ЭШС заводом было принято решение создать новую установку для ЭШС больших толщин, отвечающую современным требованиям производства с оснащением ее средствами автоматизации и мониторинга процесса. Для этой установки ИЭС им. Е. О. Патона разработал систему гарантированной подачи электродных проволок, спроектировал и изготовил сварочный автомат АШ-110 с новыми источниками питания (трансформаторы А-481Е). Указанное оборудование смонтировано на специально изготовленной заводом портальной установке. Новая уникальная

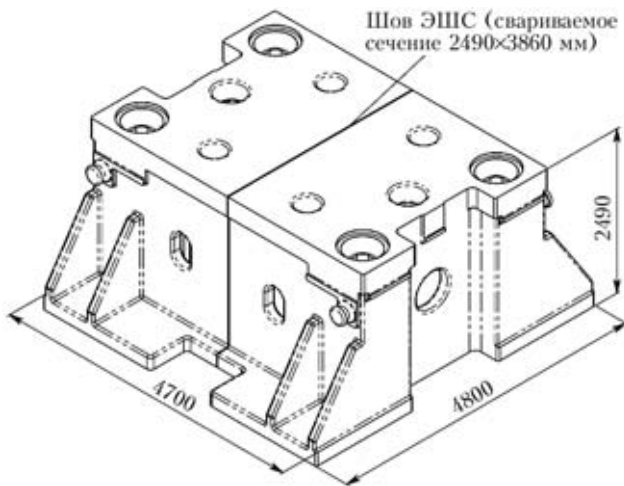


Рис. 1. Эскиз траверсы нижней

установка позволяет осуществлять сварку изделий со свариваемыми сечениями до 5000×6000 мм (толщина изделия × длина шва). При этом обеспечивается получение гарантированного качества сварных соединений в результате повышения надежности ведения электрошлакового процесса путем автоматического дублирования подаваемых в зону сварки электродных проволок [13].

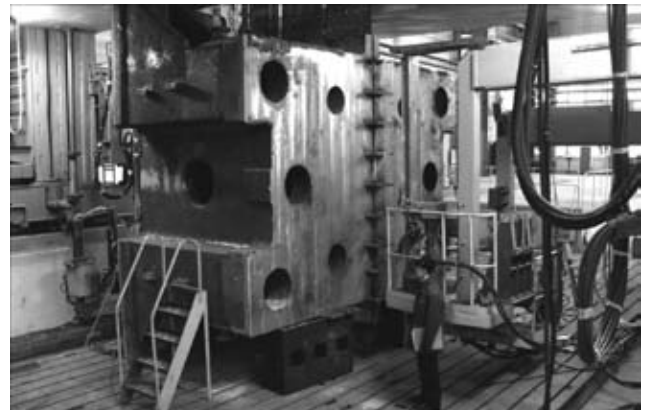


Рис. 2. Общий вид траверсы нижней на новой установке для ЭШС больших толщин

Подтверждением признания опыта и потенциала НКМЗ явился заказ ему в 2003 г. производства (по совместному инжинирингу с фирмой «SMS Eumiso GmbH WAGNER BANNING», Германия) прессов SPR-R5000 (усилием 50 МН), SPR-K5000 (усилием 50 МН) и SPR-R9000 (усилием 90 МН) для колесопрокатной линии ОАО «МНТК» (г. Н. Тагил, Россия). Часть базовых деталей указанных прессов (днища цилиндров, траверсы и проставки) изготовлены в сварном исполнении с помощью ЭШС плавящимся мундштуком. Днища цилиндров

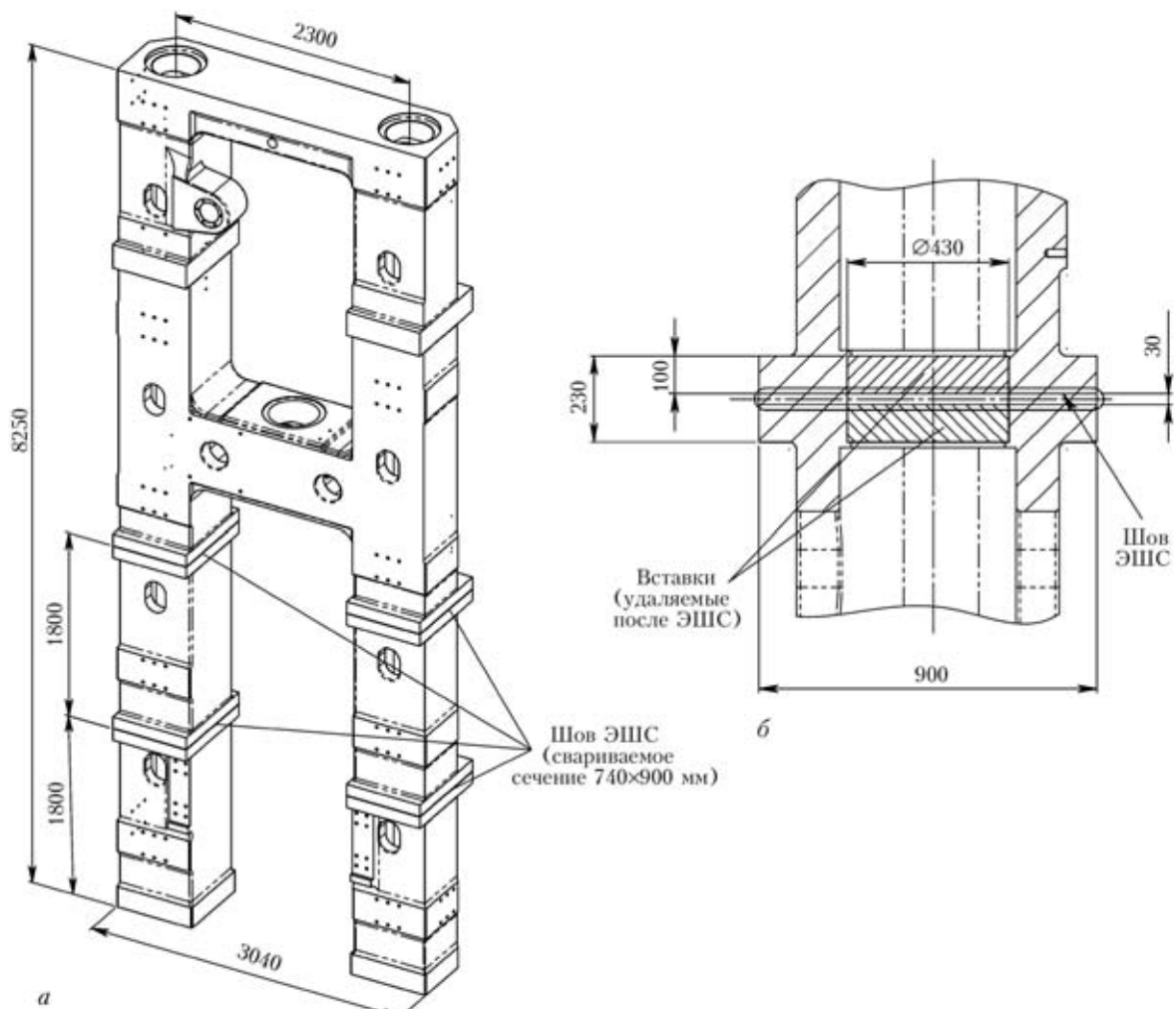


Рис. 3. Эскиз сваренной ЭШС проставки (а) и поперечное сечение сварного соединения (б)

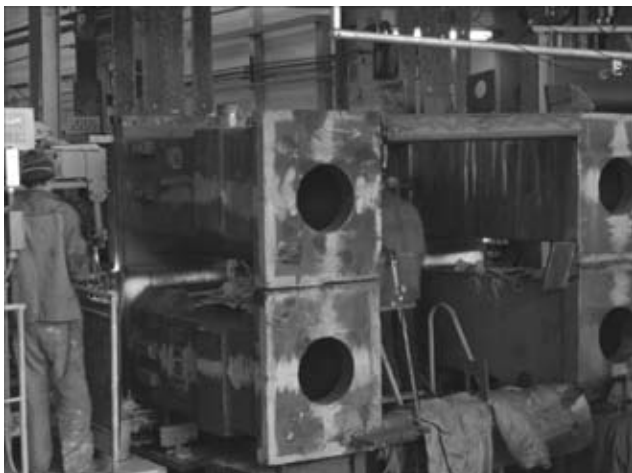


Рис. 4. Общий вид фрагмента пакета проставки, выполненный с использованием ЭШС (два стыка одновременно)

сваривали из двух поковок стали 20ХНМФА по ТУ 240013.030–87 с применением сварочной проволоки диаметром 3 мм типа Св-08ГНМА ТУ 14-15-375–95. Свариваемые сечения двух типов днищ в зависимости от конструкции цилиндров имели следующие размеры: 1730×2380 и 1430×2940 мм. Сваренные днища массой по 100 т подвергали после ЭШС термической обработке (нормализация с отпуском). Траверсу нижнюю (рис. 1, 2) массой 150 т сваривали из двух литых заготовок стали GS-20Mn5 DIN 17182 с последующей термообработкой (нормализация с отпуском). Размеры свариваемого сечения 2490×3860 мм. При ЭШС проставок массой до 60 т из литых заготовок стали GS-20Mn5 (также с использованием проволоки Св-08ГНМА) были предприняты соответствующие технологические меры, обеспечивающие получение требуемой точности и качества. Размеры свариваемых сечений проставок 740×900 мм и 880×1070 мм. С целью снижения цикла и трудоемкости изготовления проставок, состоящих из пяти элементов, их сборку и ЭШС осуществляли пакетом по 2 шт. в два этапа (рис. 3, 4).

Учитывая, что сегодня крупные металлургические предприятия стран СНГ, Европы и других регионов мира ведут реконструкцию и создают новые мощности металлургического и других видов оборудования, НКМЗ является активным участником на рынке продаж продукции и завоевывает приоритетные заказы на изготовление и поставку различного оборудования и запасных частей. В значительной мере этому способствует и много-

летний опыт сотрудничества НКМЗ с ИЭС им. Е. О. Патона в области ЭШС.

В ближайших планах сотрудничества завода с институтом совершенствование технологии ЭШС крупных бандажей (в том числе на монтаже), нетранспортабельных в цельном исполнении, с применением метода дозированного протирывания усилием усадки для обеспечения требуемой точности геометрических размеров бандажей после ЭШС [14]. При этом предусматривается также создание комплекса мобильного компактного оборудования для ЭШС и местной термической обработки.

1. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
2. А. с. 105103 СССР, МПК 21h 29/13. Способ электрошлаковой сварки / Г. З. Волошкевич, Д. А. Дудко, В. В. Черных, Л. П. Ерегин, А. В. Ярмоленко. — Опубл. 05.01.57, Бюл. № 1.
3. *Ерегин Л. П.* ЭШС плавящимся мунштуком // Автомат. сварка. — 1999. — № 9. — С. 44–46.
4. *Волошкевич Г. З.* Конструирование изделий с соединениями, выполненными электрошлаковой сваркой. — М.: ЦБНТИ, 1958. — 108 с.
5. *Технология* изготовления заготовок из стали 35ХНЗМФ методом электрошлаковой сварки с последующей ковкой / А. И. Рымкевич, Н. В. Тихомиров, М. Б. Роцин и др. // Свароч. пр-во. — 1973. — № 3. — С. 11–13.
6. *Высокотемпературная* химическая микронеоднородность в околошовной зоне / А. М. Макара, И. Я. Дзыкович, Г. Н. Гордань и др. // Там же. — 1970. — № 11. — С. 1–3.
7. *Ерегин Л. П., Малай А. Е.* Условия образования околошовных трещин-надрывов при электрошлаковой сварке хромоникельмолибденовых сталей // Там же. — 1978. — № 10. — С. 26–27.
8. *Способ* предупреждения надрывов при электрошлаковой сварке кольцевых швов толстолистовых обечайек / А. М. Макара, Ю. Я. Ковалев, И. В. Новиков и др. // Там же. — 1970. — № 10. — С. 14–15.
9. *Суцук-Слюсаренко И. И., Лычко И. И., Семенов В. М.* Основные и сварочные материалы для электрошлаковой сварки. — Киев: Наук. думка, 1981. — 112 с.
10. *Семенов В. М., Гулида В. П., Ерегин Л. П.* Установка для оценки склонности соединений к образованию трещин-надрывов при электрошлаковой сварке // Автомат. сварка. — 1981. — № 2. — С. 66–67.
11. *Сварка* массивных подштамповых плит из стали 25ХНЗМФ / М. Б. Роцин, А. С. Гельман, И. А. Борисов и др. // Свароч. пр-во. — 1975. — № 7. — С. 14–17.
12. *Адаменко В. Я., Ерегин Л. П., Малай А. Е.* Технологические особенности сварки прессы усилием 65000 тс // Там же. — 1977. — № 11. — С. 15–17.
13. *Новая* установка для электрошлаковой сварки крупных элементов на АО «Ново-Краматорский машиностроительный завод» / В. А. Невидомский, С. Г. Красильников, А. Д. Панин и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 50–52.
14. *Суцук-Слюсаренко И. И.* Метод получения точных размеров изделий при электрошлаковой сварке. — Киев: УкрНИИ-ИНТИ, 1969. — 42 с.

Information is given about the results of a multiyear cooperation of JSC «NKMZ» with the E.O.Paton Electric Welding Institute in the field of production of large billets using the electroslog welding. Examples of successful solutions on definite components are described and potentialities and prospects of further improvement of technologies of electroslog welding in heavy machine-building are shown.

Поступила в редакцию 23.06.2004

57-я ЕЖЕГОДНАЯ АССАМБЛЕЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ

С 11 по 16 июля в крупнейшем промышленном центре юга Японии городе Осака состоялась 57-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки (МИС). Организаторами-участниками выступили Японское сварочное общество (JWS) и Японское сварочное инженерное общество (JWES). В работе ассамблеи приняло участие более 600 делегатов, из которых 282 — представители Японии. Кстати, ее делегации самые многочисленные на протяжении последних 10...15 лет. Довольно многочисленные делегации были представлены из США (39 человек) и Германии (35 человек), что уже стало традицией. Затем по количеству делегатов следуют Франция (22), Китай (20), Россия (18), Украина (17), Швеция (17), Англия (16) и Словакия (10).

Из 44 стран-членов МИСа на ассамблеи отсутствовали делегации Греции, Израиля, Ливана, Ливии, Мексики и Пакистана. В то же время на ассамблею прислали свои делегации некоторые страны Юго-Восточного региона, которые не являются странами-членами МИСа: Вьетнам, Корея, Малайзия, Свазиленд и Филиппины.

Во время торжественного открытия ассамблеи состоялось вручение международных премий ряду ученых за наиболее выдающиеся работы в области сварки и смежных технологий. В этом году Международной премии Евгения Патона был удостоен д-р проф. Н. Юриока (Япония). От имени МИСа и Национального комитета по сварке Украины премию вручил академик НАН Украины К. А. Ющенко.

Первые четыре дня работы ассамблеи были посвящены заседаниям комиссий, рабочих групп и других подразделений МИСа. Представители Украины приняли участие в работе комиссий: II (Дуговая сварка и присадочные металлы), IV (Лучевые способы сварки), V (Контроль и обеспечение качества), VI (Терминология), IX (Поведение металлов при сварке), XII (Процессы дуговой сварки и производственные системы), XIV (Обучение и подготовка кадров), а также в работе Исследовательской группы 212 (Физика сварки) и Группы региональная активность.

В рамках Комиссии XIV 15-го июля были проведена международная конференция МИСа на тему «Эффективная подготовка, обучение, аттестация и сертификация персонала сварочного производства», на которой украинская делегация представила два доклада: «От квалификационных разрядов сварщика к стандартам компетентности в Украине» и «Атлас типов переноса электродного металла».

Украина является первой страной, в которой предпринимается попытка разработать стандарты компетентности

сварщика. Каждый стандарт компетентности четко регламентирует требования к сварщику определенной квалификации с учетом типа выполняемых швов, типа сварных деталей (пластины или трубы) и типа основного металла. При разработке стандартов компетентности сварщиков использована система МИС и Европейской сварочной федерации. Такой подход позволяет использовать модульные технологии подготовки сварщиков, когда сварщик осваивает только те профессиональные навыки, которые востребованы на фирме, где он работает, или помогут его более быстрому трудоустройству. Это позволяет существенно сократить время обучения сварщика и одновременно удовлетворить требования производства. Разработкой стандартов компетентности сварщика занимается Межотраслевой учебно-аттестационный центр (МУАЦ) ИЭС им. Е. О. Патона.



Место проведения конференции — Международный центр конгрессов в г. Осака

Страны-члены МИСа (по состоянию на июль 2004)			
Европа		Америка	Африка/ Азия/Океания
Австрия	Румыния	Канада	Австралия
Англия	Сербия и Черногория	Мексика	Египет
Болгария	Словакия	США	Израиль
Бельгия	Словения		Индия
Венгрия	Украина		Индонезия
Германия	Хорватия		Иран
Голландия	Чехия		КНР
Греция	Финляндия		Ливан
Дания	Франция		Ливия
Испания	Швейцария		Новая Зеландия
Италия	Швеция		Пакистан
Норвегия			Сингапур
Польша			Таиланд
Португалия			Южная Африка
Россия			Япония



Делегация Украины

На заседаниях Международного органа по аккредитации, действующего в рамках МИСа, отмечено активное участие представителей Украины в рабочих группах по разработке и совершенствованию руководящих документов системы международной квалификации и сертификации персонала сварочного производства. В настоящее время Украинский уполномоченный орган по аттестации и сертификации персонала сварочного производства



Во время церемонии вручения премии Евгения Патона



Центральная экспозиция выставки

(действующий на базе МУАЦ ИЭС им. Е.О. Патона) аккредитован на право организации подготовки и выдачи международных дипломов МИСа по следующим квалификациям: международный инженер по сварке, международный технолог по сварке, международный специалист по сварке, международный практик по сварке, международный инспектор по сварке и европейский сварщик.

В последние два дня работы ассамблеи проведена международная конференция на тему «Тенденции развития техники и перспективы технологии сварки для транспорта, земли, моря, воздуха и космоса», на которой было представлено более 70 докладов, включая 40 стендовых.

В южной части Японии, где расположен город Осака, сосредоточено много крупных предприятий таких, как Мицубиси, Кавасаки, Хитаки, Дайхацу и др. Делегатам и гостям ассамблеи МИСа была предоставлена возможность совершить технические визиты на некоторые из них, а также в Институт лазерных технологий и соединения материалов, Исследовательский институт сварки и Университет г. Осака. В отзывах делегатов, посетивших эти предприятия, институты и университет, отмечался исключительный порядок и чистота, наличие высокотехнологичных производств и высокая культура производства.

Делегаты и гости ассамблеи МИСа смогли также посетить международное сварочное шоу «Технологии сварки и соединения материалов, объединяющие мир», приуроченное к ассамблеи МИСа. В трех огромных павильонах свои экспонаты выставили более 160 фирм со всего мира. Был на нем представлен и Институт электросварки им. Е.О. Патона. Специалисты могли познакомиться на выставке с самыми передовыми технологиями в области



Академик НАН Украины Л. М. Лобанов знакомит представителя делегации США с экспозицией ИЭС



соединения материалов. Например, сразу несколько фирм демонстрировали ручной инструмент («лазерная ручка»), в котором реализован процесс гибридной сварки «лазер + ТИГ». Как и ожидалось, на выставке было представлено множество роботов. Потенциальные потребители выставленного оборудования, сварочных материалов, компьютерных программ, приборов, инструмента и литературы имели возможность подобрать для себя то, что им было нужно с учетом технического уровня разработки и ее цены. Например, цена сварочного инверторного источника питания для ручной дуговой сварки японского или американского производства достигала 3...4 тыс. дол. США, в то время как одна из корейских фирм предлагала такие источники питания (естественно, более простые) по цене 170...200 дол. за штуку.

На закрытии ассамблеи от имени МИС и Национального комитета по сварке Украины академик НАНУ К. А.

Ющенко вручил «хозяйке» ассамблеи — японской представительнице оргкомитета титановую розу, изготовленную мастером производственного обучения МУАЦ ИЭС им. Е. О. Патона Г. Г. Дочкиным. Трудно представить себе церемонию закрытия ассамблеи без этого события, которое уже стало традицией и неукоснительно выполняется на протяжении вот уже пяти последних ассамблей МИСа.

В целом, участие делегации Украины в 57-й Ежегодной ассамблеи МИС следует признать успешным.

Ассамблея МИСа и международная конференция были организованы и проведены на очень высоком уровне, что было отмечено руководством МИСа.

Очередная ассамблея состоится 10–16 августа 2005 г. в столице Чехии Праге.

В. Е. Пономарев, канд. техн. наук

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ



В сентябре 2004 г. заведующему отделом технической диагностики сварных конструкций Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины доктору технических наук, профессору Анатолию Яковлевичу Недосеке исполнилось 70 лет. Анатолий Яковлевич — видный ученый в области оптимизации технологий изготовления и эксплуатации сварных конструкций с учетом требований их прочности,

надежности и прогнозирования их остаточного ресурса, а также в области разработки нового научно-прикладного направления — технической диагностики сварных конструкций, объектов и сооружений. С 1958 г. (более 45 лет) научная и практическая деятельность А. Я. Недосеки связана с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

В начале своего трудового пути Анатолий Яковлевич провел успешные лабораторные и прикладные исследования в области расчета и разработки технологий изготовления уникальных и ответственных в эксплуатации сварных конструкций: разработан расчетный метод определения остаточных сварочных напряжений и учета их влияния на несущую способность конструкций при продольном изгибе; разработаны эффективные способы снижения остаточных сварочных напряжений, а также ряд новых методов исследования сварочных деформаций и напряжений. На основе этих разработок созданы и внедрены в производство оригинальные устройства и аппаратура.

Позже А. Я. Недосека активно развивает научно-исследовательские работы, связанные с обеспечением безопасной эксплуатации конструкций и сооружений. В составе секции «Сварные конструкции» Научного Совета функционирует рабочая группа № 3 «Техническая диагностика и точность сварных конструкций», которую возглавляет Анатолий Яковлевич. Она руководит новым научным направлением — диагностикой технического состояния сварных конструкций в процессе их эксплуатации, оценкой их реального остаточного ресурса. Круг интересов А. Я. Недосеки в данном направлении научной деятельности: разработка теории, методов и средств диагностики и оценки состояния конструкционных материалов, вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций, мониторинг и оптимизация технологий диагностирования крупномасштабных ответственных в эксплуатации объектов.

А. Я. Недосека активно работает по подготовке экспертов, специалистов, инженерных и научных кадров, под его руководством подготовлены и защищены соискателями института шесть кандидатских диссертаций. Он автор более 150 печатных работ и изобретений в области технологии производства и обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. А. Я. Недосека — заместитель Председателя Технического комитета Украины по стандартизации № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», созданного в 1993 г., заместитель главного редактора журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», который учрежден по его инициативе в 1985 г.