



№ 11 (619)
Ноябрь 2004

Издается с 1948 года

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. Зельчиненко, А. Я. Ищенко,
И. В. Кривцун, С. И. Кучук-Яценко,
Ю. Н. Ланкин,
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодиев (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. Пилиярчик (Польша)
Чжан Янмин (Китай)
В. К. Шелег (Беларусь)

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институту 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. Петушкив
Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
Журнал входит в перечень
утверженных 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.
Цена договорная.

Фото на 1 стр. обложки Е. В. Зеленина

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кучук-Яценко В. С., Швец В. И., Чвертко П. Н., Гордань Г. Н., Сахацкий А. Г., Ременяк И. П. Контактная стыковая сварка дисперсно-упрочненного медного сплава системы Cu-Al₂O₃ 3

Маркашова Л. И., Чвертко П. Н., Ременяк И. П., Половецкий Е. В., Алексеенко Т. А. Особенности формирования структуры соединений стали с алюминием при контактной сварке 7

Письменный А. С., Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Шейковский Д. А., Кислицын В. М. Особенности расчета режимов магнитно-импульсной сварки 15

Астахов Е. А. Антифрикционные свойства и коррозионная стойкость детонационного покрытия из Al₂O₃, применяемого в судовом машиностроении 20

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Патон Б. Е., Бондарев А. А. Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций 23

Замков В. Н., Вржижевский Э. Л., Топольский В. Ф., Петриченко И. К. Влияние галогенидных флюсов на пористость швов титанового сплава BT6, выполненных ЭЛС 32

Корж В. Н., Попиль Ю. С. Влияние углеводородных добавок на структуру водородно-кислородного пламени и распределение температуры по длине факела 36

Валиц К. А., Пасечник С. Ю. Повышение склонности наплавленной стали 110Г13Л к деформационному упрочнению 41

Из истории пайки

Жадкевич А. М. История возникновения, технологические особенности и технические возможности первых способов пайки 43

Попов С. Н., Антонюк Д. А. Перспективы использования новых методов дистанционного образования инженерных кадров в сварочном производстве 49

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Рыжов Р. Н., Кожухарь В. А., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А. Применение внешних электромагнитных воздействий для

улучшения механических свойств швов при подводной мокрой сварке 53

Разработано в ИЭС 6, 19, 55, 59, 63

Диссертация на соискание ученой степени 55

Патенты в области сварочного производства 55

По зарубежным журналам 58

ХРОНИКА

Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» 60

Международный семинар «Современное сварочное оборудование и процессы сварки в промышленности» 62

ИНФОРМАЦИЯ 64

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:



Каховский завод электросварочного оборудования



NKMZ
СП «ТМ ВЕЛДТЕК»

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



Ново-Краматорский машиностроительный завод



NKMZ
КЗЭСО

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

Avtomicheskaya Svarka (Automatic Welding)

№ 11 (619)

November 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. Makhnenco, 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. Kotyiar,
T. V. Yushtina
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.

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Kuchuk-Yatsenko V. S., Shvets V. I., Chvertko P. N., Gordan G. N., Sakhatsky A. G., Remenyak I. P. Flash-butt welding of dispersion-strengthened copper alloy of Cu-Al₂O₃ system 3
Markashova L. I., Chvertko P. N., Remenyak I. P., Polovetsky E. V., Alekseenko T. A. Specifics in formation of structure of steel-aluminium joints in flash-butt welding 7
Pismennyi A. S., Pentegov I. V., Stemkovsky E. P., Sheikovsky D. A., Kislitsin V. M. Peculiarities of calculation of magnetic-impulse welding conditions 15
Astakhov E. A. Antifriction properties and corrosion resistance of Al₂O₃ detonation coating used in marine engineering 20

INDUSTRIAL

- Paton B. E., Bondarev A. A. State-of-the-art and new technologies of EBW of structures 23
Zamkov V. N., Vrzhizhevsky E. L., Topolsky V. F., Petrichenko I. K. Effect of halogenide fluxes on porosity of EBW welds made from titanium alloy VT6 32
Korzh V. N., Popil Yu. S. Effect of hydrocarbon additions on structure of hydrogen-oxygen flame and distribution of temperature in the flame length 36
Valits K. A., Pasechnik S. Yu. Increase of susceptibility of deposited steel 110G13L to strain hardening 41

FROM HISTORY OF BRAZING

- Zhadkevich A. M. History of origination, technological features and technical capabilities of the first methods of brazing 43
Popov S. N., Antonyuk D. A. Prospects in use of new methods of training the engineering personnel of welding industry by correspondence 49

BRIEF INFORMATION

- Ryzhov R. N., Kozhukhar V. A., Maksimov S. Yu., Prilipko E. A. Application of external electromagnetic actions for improvement of mechanical properties of welds in underwater wet welding 53
Developed at the Paton Welding Institute (PWI) 6, 19, 55, 59, 63
Thesis for scientific degree 55
Patents in the field of welding 55
Review of foreign journals 58

NEWS

- International Conference «Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes» 60
International seminar «Advanced Welding Equipment and Processes in Industry» 62

INFORMATION

64



УДК 621.791.762.1

КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО МЕДНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu-Al₂O₃

В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. И. ШВЕЦ, П. Н. ЧВЕРТКО, Г. Н. ГОРДАНЬ, кандидаты техн. наук, А. Г. САХАЦКИЙ, И. П. РЕМЕНЯК, инженеры (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен технологический процесс контактной стыковой сварки дисперсно-упрочненного медного сплава AL-25 (С 15725) с принудительным формированием. Приведены данные металлографического и микрорентгеноспектрального анализа микроструктуры, результаты механических испытаний сварных соединений.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, усилие осадки, время сварки, дисперсно-упрочненный медный сплав, рекристаллизация, грат, микроструктура

Одним из важных требований, предъявляемых к современным конструкционным материалам, является сохранение их работоспособности при температурах, близких к температуре плавления.

Упрочнение сплавов с применением термомеханической обработки реализуется при температурах, не превышающих $(0,3 \dots 0,4)T_{\text{пл}}$. Возможности комплексного легирования в сочетании с термообработкой шире. В некоторых случаях удается поднять рабочие температуры сплавов до $(0,7 \dots 0,8)T_{\text{пл}}$.

Композиционные материалы, в частности дисперсно-упрочненные сплавы (ДУС), имеют жаропрочность более высокого уровня. Упрочнение таких сплавов достигается введением в матрицу стабильных дисперсных ($1 \dots 20$ нм) тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов и др.), не взаимодействующих с матрицей вплоть до температуры плавления. Упрочняющие частицы активно влияют на формирование субструктур сплавов и стабилизацию ее в условиях эксплуатации. ДУС сохраняют длительную работоспособность при температурах $(0,9 \dots 0,95)T_{\text{пл}}$.

Повышение жаропрочности медных сплавов дисперсионным упрочнением, в отличие от легирования, практически не ухудшает электро- и теплопроводность, т. е. основные характеристики, определяющие область их применения [1]. Решающее значение это имеет для материала обмоток роторов электродвигателей, трубчатых теплообменников, деталей электровакуумных приборов, электроконтакторов и др., работающих при повышенных температурах.

Дисперсно-упрочненная медь широко применяется в сварочной технике при изготовлении электродов для точечной и роликовой сварки, мундштуков для автоматов и полуавтоматов для сварки в защитных газах. Срок службы этих изделий увеличивается в 5...10 раз по сравнению с традиционными медными.

Основной проблемой при соединении ДУС различными способами сварки плавлением является то, что при переходе основного металла в жидкое

состояние нарушается упорядоченное распределение упрочняющих частиц. Образующиеся в результате этого микронеоднородности существенно снижают прочностные характеристики соединений [2, 3].

Контактная стыковая сварка с принудительным формированием соединения является одним из немногих способов, который позволяет соединять практически все известные металлы и сплавы, обеспечивая высокую стабильность и качество соединений [4].

Нами рассмотрена возможность использования контактной стыковой сварки сопротивлением для получения соединений из меди, дисперсно-упрочненной оксидом алюминия (Al_2O_3). В экспериментах использован сплав AL-25 (С 15725) следующего содержания (согласно ASTM/AWS), мас. %: 99,39...99,5 Cu, 0,45...0,55 Al₂O₃, до 0,01 Fe, до 0,01 Pb, до 0,4[O]. Соединяли прутки диаметром 16 мм. Исследована микроструктура (рис. 1, 4), химическая неоднородность, распределение микротвердости и прочностные характеристики полученных сварных соединений.

Металлографические исследования и микрорентгеноспектральный анализ проведен с использованием оптического микроскопа «Neophot-32», растрового электронного микроскопа JSM-840, микроскопа-микроанализатора Т-200 и микрозонда MS-50 фирмы «Самеса». Микротвердость измеряли на микротвердомере фирмы «Leco». Отпечатки делали с нагрузкой 0,1 Н и временем выдержки 15 с. Рас-

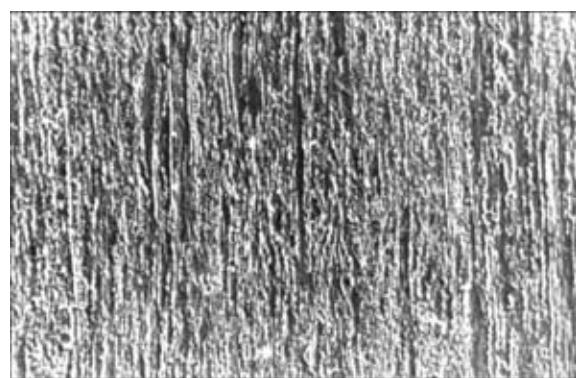


Рис. 1. Микроструктура сплава AL-25 (С 15725) в состоянии поставки, $\times 500$

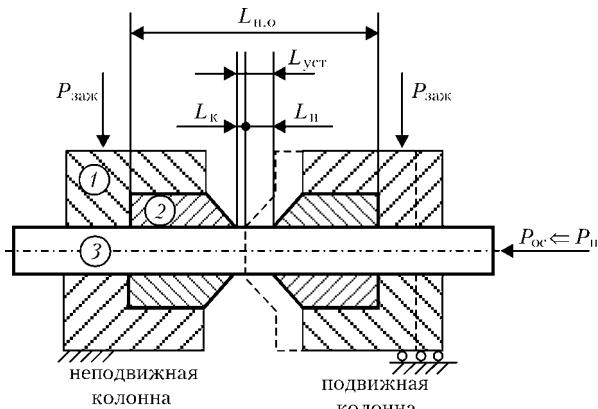


Рис. 2. Схема контактнойстыковой сварки с принудительным формированием соединения: 1 — прижимы; 2 — формирующее устройство; 3 — соединяемые изделия; — — — конечное положение подвижной колонны (остальные обозначения см. в тексте)

стояние между отпечатками 10 мкм. Перед началом исследований образцы подвергали механической полировке и ионно-вакуумному травлению. Сварку опытных образцов проводили на лабораторной стыковарочной машине мощностью 100 кВт·А. Использование традиционной технологической схемы контактнойстыковой сварки сопротивлением не позволило получить сварные соединения требуемого качества.

Положительный результат был достигнут при использовании технологической схемы сварки с принудительным формированием соединения и увеличенным «тепловым» вылетом, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона [5–7]. Данная технологическая схема (рис. 2) предусматривает применение специальной технологической оснастки, снабженной жаростойкими электро- и теплоизолированными формирующими элементами. В ис-

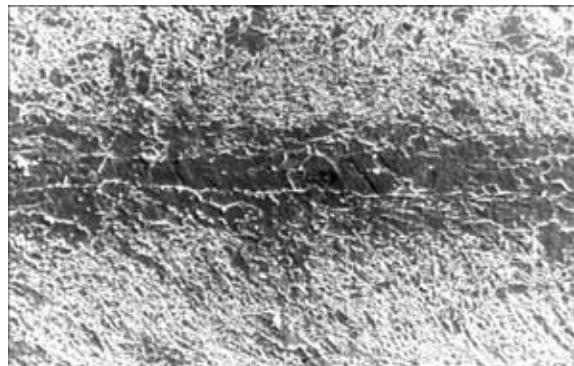


Рис. 4. Микроструктура соединения сплава AL-25 (C 15725), $\times 350$

ходном положении свариваемые образцы устанавливаются на некотором начальном расстоянии $L_{уст}$, включающем припуски на сварку, и зажимаются с усилием зажатия $P_{заж} = 2,5 \dots 3,0 P_{ос}$ (усиление сжатия при осадке). Затем соединяемые образцы сжимаются с небольшим усилием P_n и включается сварочный ток.

Проходящий ток нагревает участок общего нагрева $L_{H,0}$, который в 6...10 раз больше $L_{уст}$. Наибольшее тепловыделение происходит в зоне контакта соединяемых поверхностей. При этом участки под формирующими элементами выступают в роли тепловых барьеров, обеспечивая быстрый и равномерный нагрев образцов. В процессе нагрева под действием усилия нагрева P_n металл деформируется и подвижный зажим перемещается на величину L_n , после чего к образцам прикладывается более высокое усилие осадки $P_{ос}$, под воздействием которого происходит интенсивная пластическая деформация свариваемых образцов до положения L_k . Излишки перегретого металла выдав-

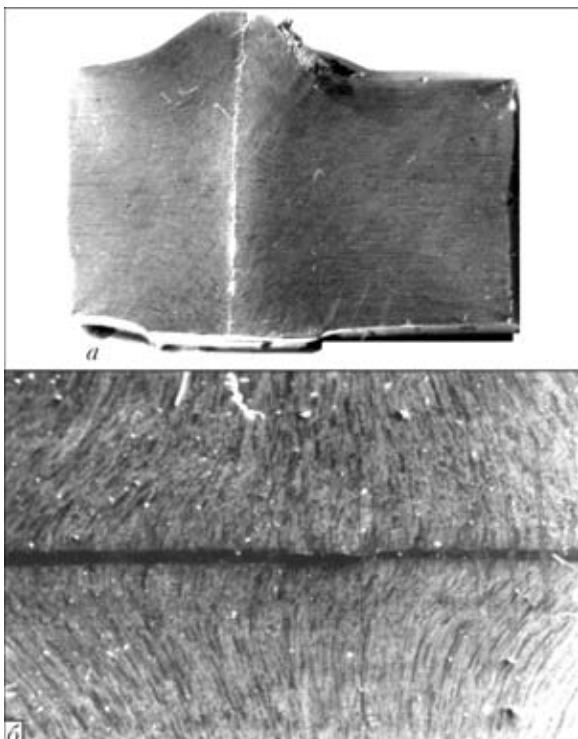


Рис. 3. Общий вид (а) и макроструктура сварного соединения (б) сплава AL-25 (C 15725), $\times 20$

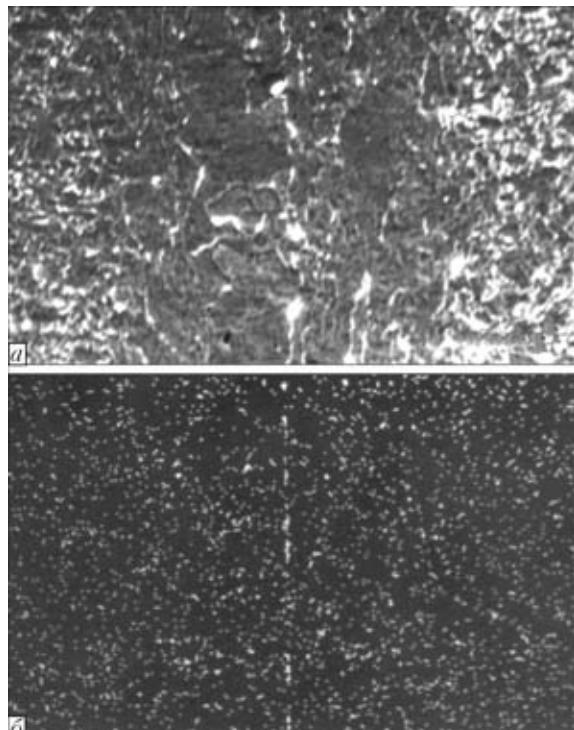


Рис. 5. Распределение алюминия в поперечном сечении сварного соединения сплава AL-25 (C 15725): а — микроструктура, $\times 400$; б — сканирующая микроскопия анализируемого участка

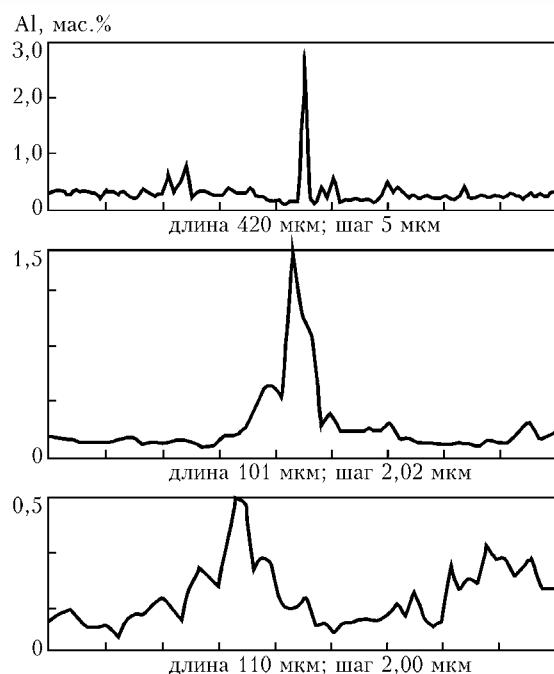


Рис. 6. Профилограммы распределения алюминия в поперечном сечении по линии контакта сварного соединения сплава AL-25 (С 15725)

ливаются в грат, который удаляется ножами формирующего устройства сразу после отключения сварочного тока. Параметры сварки следующие: $P_{\text{н}} = 9,0 \dots 14,0$ МПа; $P_{\text{oc}} = 1100 \dots 1800$ МПа; вторичное напряжение холостого хода $U_{\text{x.x}} = 4 \dots 7$ В; $\tau_{\text{cb}} = 5 \dots 10$ с.

Металлографические исследования показали, что формирование сварных соединений сопровождается значительной пластической деформацией (ширина зоны деформации около 10 мм) и практически полным удалением из соединения жидкой фазы (рис. 3). В зоне деформации сохраняется волоконная структура. Процессы рекристаллизации, как видно из анализа микроструктуры, развиваются в узком слое на контактной границе. Ширина этого слоя в пределах соединения нестабильна и достигает 200 мкм (рис. 4). По линии стыка наблюдается полоса вытянутых поперек направления осадки крупных зерен. По мере удаления от стыка размер зерен уменьшается и они приобретают равносовную форму. Необходимо отметить, что на контактной границе наряду с образованием общих зерен отмечено наличие единичных пор.

Исследование распределения микротвердости в соединении показало, что крупные зерна на контактной границе характеризуются минимальными значениями $HV 0,1-828 \dots 880$. В примыкающих зернах меньшего размера микротвердость возрастает и в области неукрупненных зерен достигает значений микротвердости основного металла $HV 0,1-1290$. Ширина зоны соединения с пониженной твердостью составляет 50...80 мкм.

Исследование распределения в соединении частиц Al_2O_3 проводили по результатам микрорентгеноспектрального анализа распределения алюминия. Это допустимо, поскольку оксид алюминия в меди характеризуется высокой стабильностью.

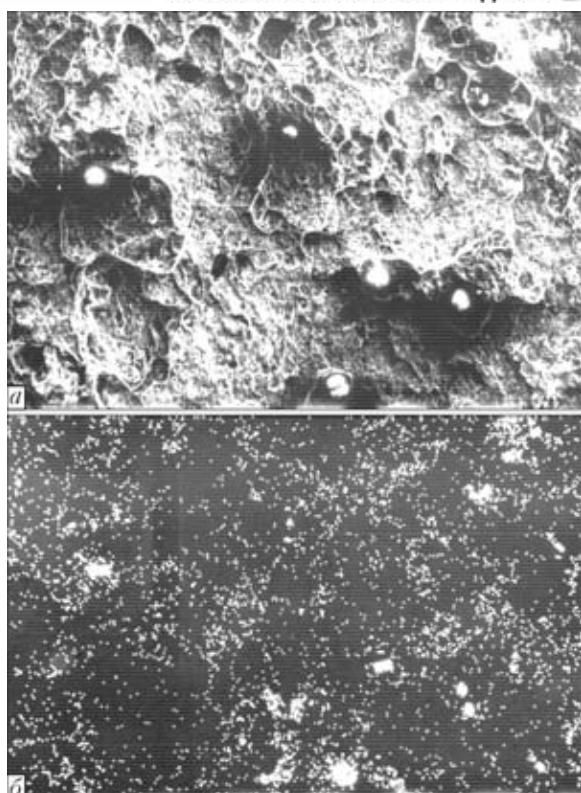


Рис. 7. Распределение алюминия на поверхности излома сварного соединения сплава AL-25 (С 15725), $\times 100$: *a* — фрактографическая картина анализируемого участка; *b* — сканиграмма

Согласно сканиграмме (рис. 5, 6), позволяющей фиксировать перепад концентраций 2...3 мас. %, распределение частиц Al_2O_3 в соединении однородно и не отличается от такового в основном металле. Участки локального повышения концентрации алюминия отмечены на контактной границе. При линейном сканировании через эти участки с чувствительностью менее 0,5 мас. % на кривых распределения алюминия зафиксированы пики при пересечении утолщенных границ зерен в зоне стыка (рис. 6). Концентрация алюминия возрастает до 1,5...3 мас. %. Нарушение однородности распределения частиц Al_2O_3 незначительно и связано с неполным выдавливанием жидкой фазы при осадке.

Прочность соединений на разрыв составила 0,75...0,80 прочности основного металла. Разрушение образцов происходит по шву при незначительной пластической деформации. Поверхность излома мелкокристаллическая.

Электронно-фрактографические исследования показали, что в микроструктуре поверхности излома при наличии элементов квазискола преобладает ямочный рельеф, характерный для вязкого разрушения (рис. 7). Это объясняется тем, что разрушение происходит по узкому слою рекристаллизованного металла.

Распределение алюминия по элементам структуры поверхности излома практически однородно. На некоторых участках в микроуглублениях встречаются включения размером до 20 мкм, обогащенные алюминием, которые не могут быть инициаторами разрушения.

**Выходы**

1. Агломерация частиц оксида алюминия в соединении сплава AL-25 (С 15725), полученного контактной стыковой сваркой, незначительна и носит локальный характер.

2. Прочность сварных соединений на статический разрыв составила 0,75...0,80 прочности основного металла. Прочностные характеристики соединения определяются свойствами зоны рекристаллизованного металла.

3. Дальнейшие исследования по подготовке к сварке и послесварочной термообработке деталей могут обеспечить повышение механических свойств соединений.

4. Успешное использование контактной стыковой сварки для получения качественных соединений из дисперсно-упрочненных медных сплавов

The technology of flash-butt welding of dispersion-hardened copper alloy Al-25 (C 15725) with forced formation is considered. Data are given on the metallographic and X-ray microprobe analysis of the microstructure, as well as results of mechanical tests of welded joints.

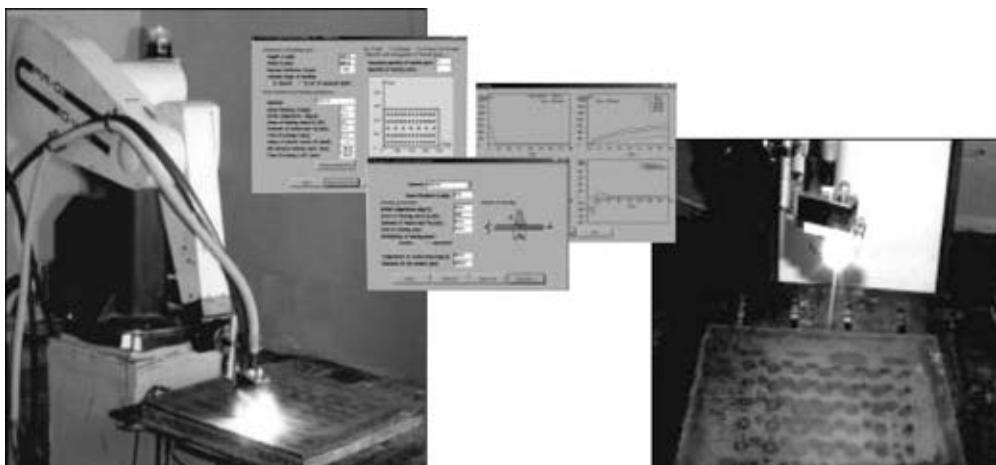
потребует разработки специализированного сварочного оборудования.

1. Портной К. И., Бабич Б. Н. Дисперсно-упрочненные материалы. — М.: Металлургия, 1974. — 200 с.
2. McFayden A. A., Kapoor R. R., Eagar T. W. Effect of second particles on direct brazing of alumina dispersion hardened cooper // Welding Res. Suppl. — 1990. — № 11. — P. 399.
3. Ambroziak A., Lison R. Welding and brazing material // Welding and Cutting. — 1992. — № 7. — P. 124–126.
4. Куцук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
5. А. с. 495174 СССР, МКИ 1323К 11/04. Способ контактной стыковой сварки / Г. П. Сахацкий, В. К. Лебедев, Р. М. Широковский и др. — Опубл. 15.12.75, Бюл. № 46.
6. Сахацкий Г. П., Бутник А. П. Контактная стыковая сварка меди высокой чистоты // Автомат. сварка. — 1970. — № 12. — С. 24–27.
7. Сахацкий Г. П., Литвинчук М. Д., Шелест Н. А. Технология и машина для стыковой сварки медных витков // Там же. — 1968. — № 6. — С. 58–60.

Поступила в редакцию 15.04.2004

Разработано в ИЭС**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПРАВКА СВАРНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Объемы термической правки по затратам квалифицированной ручной силы составляют 15...50 % суммарного объема затрат на сборку и сварку корпусных конструкций. Для решения этой проблемы в ИЭС им. Е.О.Патона разработана автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости. Создан автоматизированный комплекс (рисунок) на основе математического моделирования, в состав которого входит манипуляционный робот, системы измерения деформаций и микроплазменный источник нагрева.



Автоматизированная термическая правка позволяет исключить квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности листа сварной конструкции, повышает производительность процесса, снижает затраты энергии, улучшает экологические показатели.

Назначение: автоматизация тепловой правки деформаций бухтиноватости тонколистовых сварных конструкций. **Область применения:** судо-, вагоностроение и другие отрасли промышленности, производящие различные корпусные сварные конструкции.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11. ИЭС им. Е. О. Патона.
Тел.: (38044) 261 50 24; факс: (38044) 227 65 57; e-mail: d34@pwi.relc.com

УДК 621.791:762.1

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ С АЛЮМИНИЕМ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Л. И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, **П. Н. ЧВЕРТКО**, канд. техн. наук, **И. П. РЕМЕНЯК**, **Е. В. ПОЛОВЕЦКИЙ**,
Т. А. АЛЕКСЕЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены закономерности формирования структуры и фазового состава в сталялюминиевых соединениях, полученных контактнойстыковой сваркой оплавлением. Показано влияние фазового состава на эксплуатационные и механические характеристики соединений.

Ключевые слова: контактнаястыковая сварка оплавлением, фазообразование, сталялюминиевое соединение, характер излома, стехиометрический состав, интерметаллидное соединение, электросопротивление, микротвердость

Широкое использование в промышленности соединений разнородных материалов во многом обусловлено уникальными возможностями совмещения в изделиях достоинств каждого из соединяемых материалов. Например, в соединениях алюминия и его сплавов со сталью различного класса сочетаются легкость и коррозионная стойкость алюминия с прочностью стали. Этим объясняется достаточно широкое использование комбинированных сталялюминиевых конструкций и узлов в авиационной, космической, атомной энергетике, а также автомобильной, судостроительной, химической и других отраслях промышленности.

Однако при получении качественных соединений возникают проблемы, связанные с существенным отличием теплофизических свойств соединяемых материалов (температура плавления, коэффициенты линейного расширения, теплопроводность и теплопемкость), обуславливающих возникновение значительных напряжений в зоне сварки [1, 2].

Еще одной существенной причиной нестабильности механических и эксплуатационных характеристик соединений металлов, отличающихся ограниченной взаимной растворимостью (именно к таким материалам относятся сталь и алюминий), является склонность к образованию в зоне их контактного взаимодействия хрупких интерметаллидных фаз [3, 4].

Для решения комплекса указанных проблем перед технологами и исследователями ставится общая задача — детальное изучение закономерностей структуро- и фазообразования в зоне сварки при различных технологических параметрах с целью определения причин снижения механических характеристик и других свойств сталялюминиевых соединений. Некоторые из полученных результатов изложены в представленной работе.

В настоящей статье рассматриваются особенности формирования структуры и характера фазообразования в зоне сварки сталялюминиевых соединений (сталь Ст3+сплав алюминия АК4), полученных на различных режимах контактнойстыковой сварки (КСС) непрерывным оплавлением.

Сечение свариваемых заготовок составляло около 110...112 мм².

Эксперименты проводили на лабораторнойстыковарочной машине мощностью 190 кВ·А с усилием осадки до 130 кН, скорость перемещения подвижной колонны — от 0,1 до 32 мм/с, скорость осадки — до 250 мм/с. Сваривали две партии образцов. Время сварки составляло 4 (I режим) и 8 с (II режим).

Исследования проводили с использованием методов оптической и аналитической растровой электронной микроскопии, что позволило получить информацию о влиянии технологических параметров на концентрационные, структурные и фазовые превращения в зоне сварки, а также на характер разрушения полученных соединений и их электротехнические характеристики.

На рис. 1 и 2 представлены общий вид структуры и отдельные фрагменты зоны сварного соединения Ст3+АК4, полученного на I и II режимах, а на рис. 3 и 4 показано изменение содержания химических элементов по мере перехода от одного из свариваемых металлов (сплава алюминия АК4) через границу раздела в различных ее участках, отличающихся структурой и фазовыми выделениями (ФВ), к другому — стали Ст3.

На рис. 5 представлено распределение объемной доли V и размеров ФВ вдоль зоны сварки при использовании различных технологических режимов. Характер разрушения соединений, полученных при исследуемых режимах, показан на рис. 6. На рис. 7 приведены экспериментальные данные, характеризующие зависимость локальных значений электросопротивления R соединений от размеров интерметаллидных фаз, образующихся в зоне сварки.

Исследованиями установлено, что для соединений монолитных образцов стали Ст3 со сплавом алюминия АК4, выполненных на I режиме, характерно следующее. Наиболее резкое изменение содержания железа в сторону алюминия (от 12 до 2 мас. %) наблюдается на глубине $\delta \approx 5$ мкм от поверхности раздела. На глубине $\delta \approx 50...100$ мкм содержание железа уменьшается до 0,3 мас. %. Основные изменения содержания алюминия в сторону железа происходят преимущественно на глубине до 5 мкм (рис. 3, а).

© Л. И. Маркашова, П. Н. Чвертко, И. П. Ременяк, Е. В. Половецкий, Т. А. Алексеенко, 2004

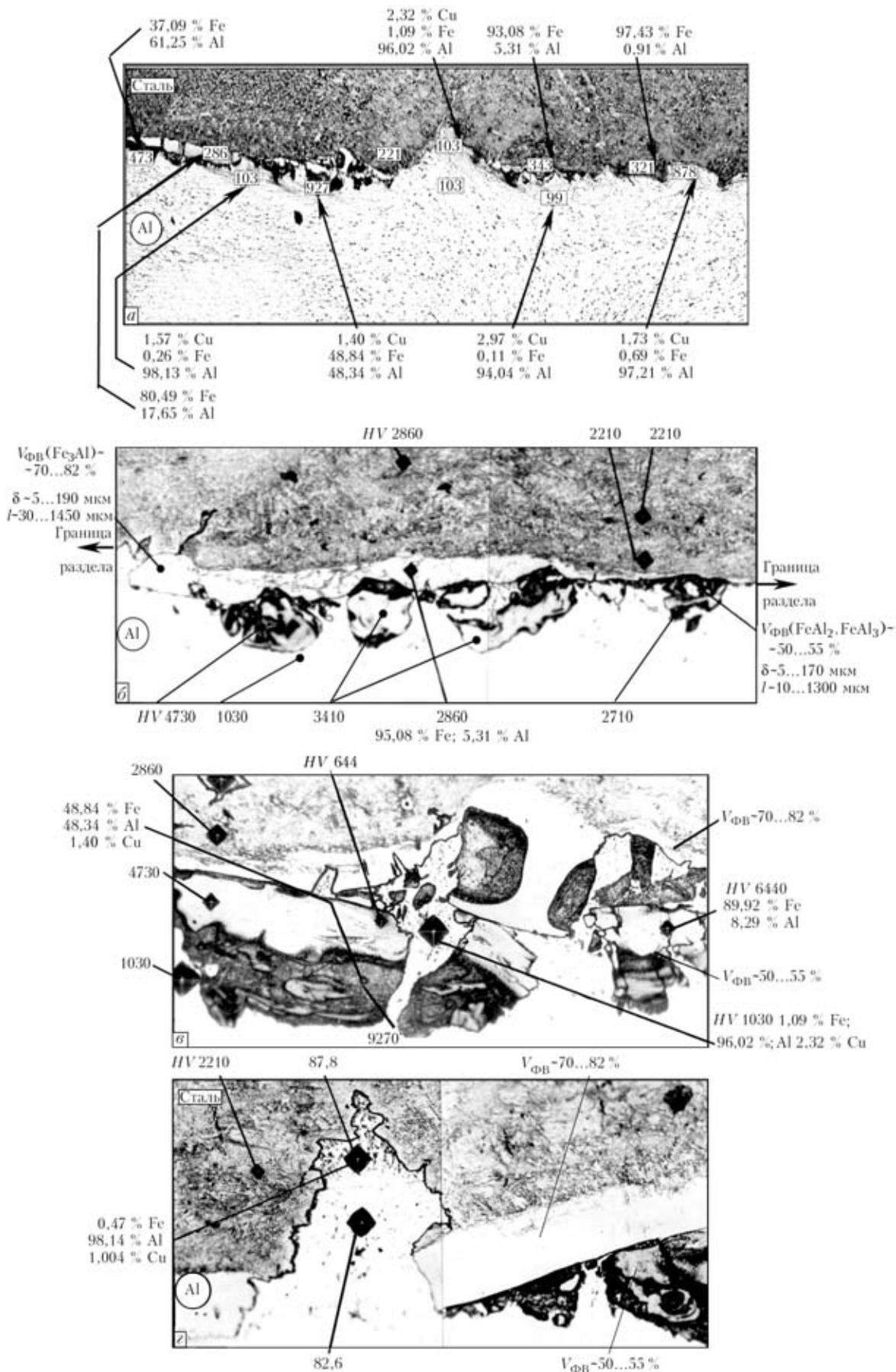


Рис. 1. Микроструктура зоны сварного соединения Ст3+АК4, полученного КСС непрерывным оплавлением на I режиме: а — общий вид ($\times 50$), б-г — отдельные участки с фазовыми выделениями ($\times 300$). Здесь и на рис. 2 элементный состав фаз приведен в массовых процентах, состав ФВ — в объемных процентах и микротвердость (по Бринелю) — в мегапаскалях

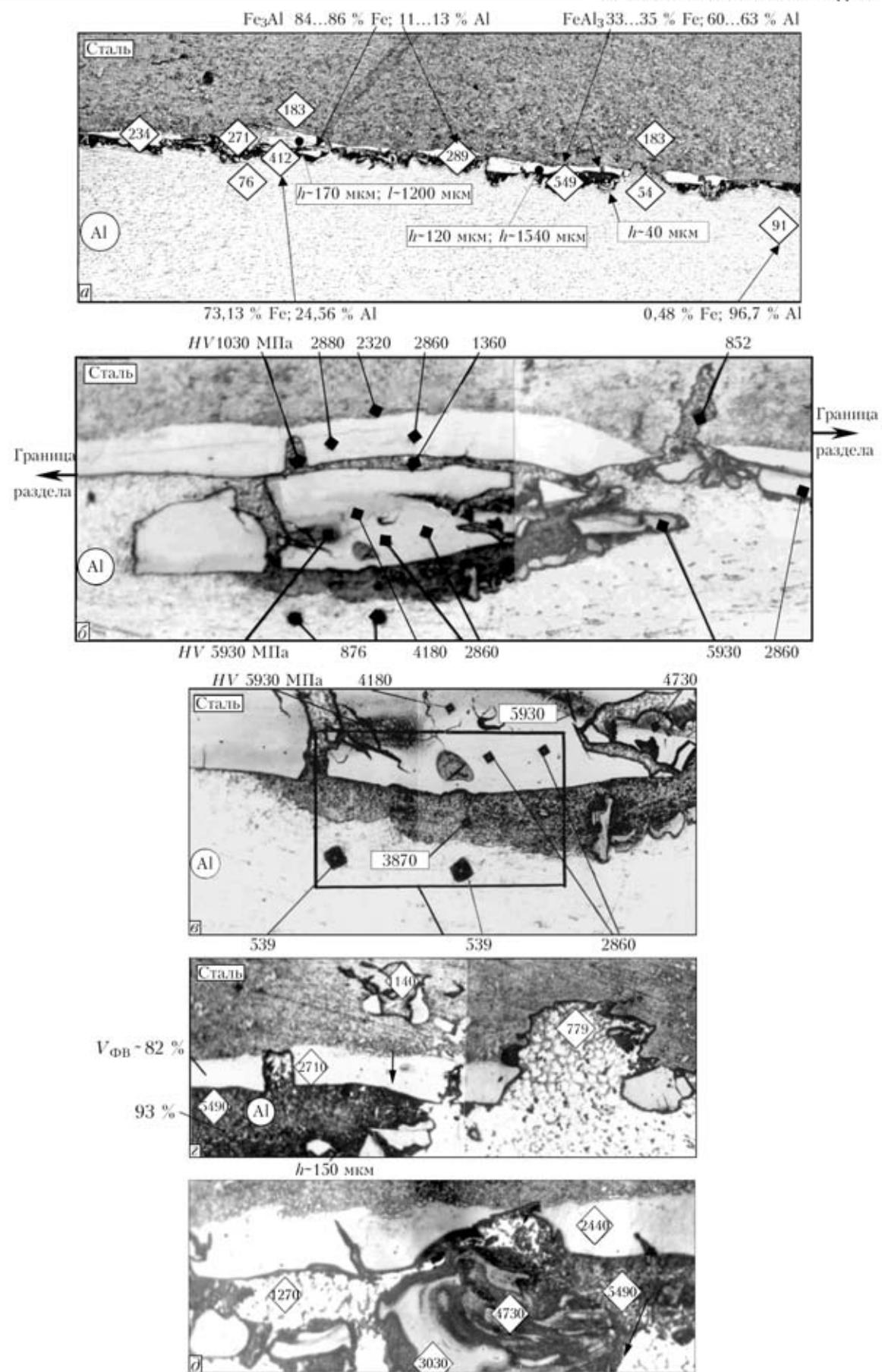


Рис. 2. Микроструктура зоны сварного соединения Ст3+АК4, полученного КСС непрерывным оплавлением на II режиме: *a* — общий вид ($\times 50$); *b*—*d* — отдельные участки с фазовыми выделениями (*b*, $\times 156$, *c*, $\times 150$, *d*, $\times 300$)

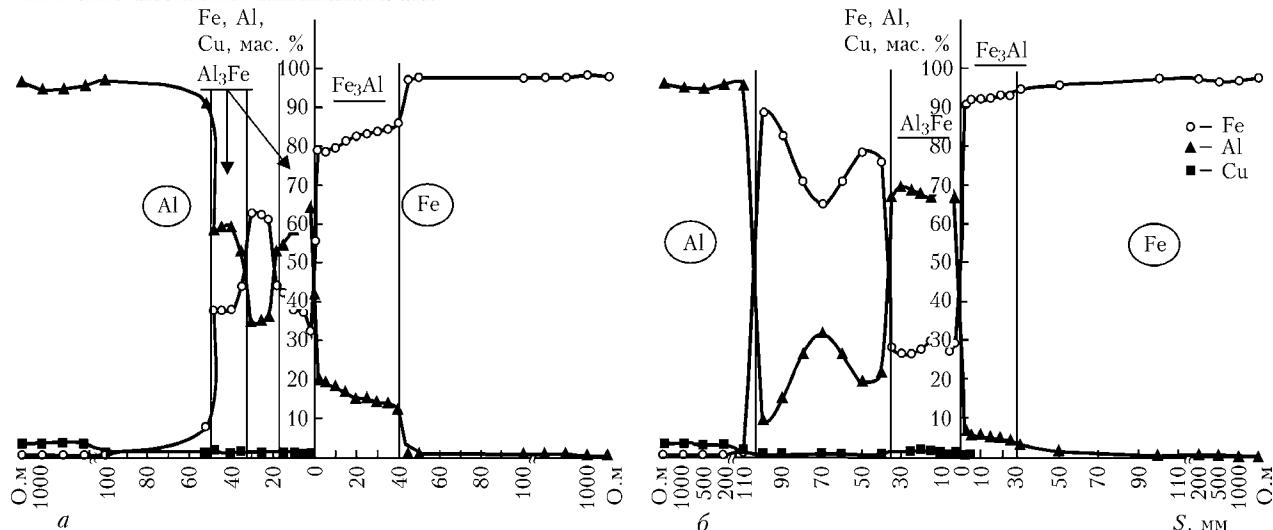


Рис. 3. Изменение содержания основных химических элементов в сварном соединении Ст3+АК4, полученном КСС непрерывным оплавлением на I (а) и II (б) режимах: S — расстояние от поверхности раздела

В случае сварки соединений, выполненных на I режиме, следует отметить, что значительная часть (около 30 %) поверхности контакта практически свободна от ФВ. Металл в этих зонах отличается незначительным изменением содержания химических элементов, т. е. соответствует состоянию твердого раствора, а также несколько повышенной микротвердостью. Так, со стороны сплава алюминия значения микротвердости приблизительно составляют HV 90...100 МПа (при микротвердости основного металла приблизительно HV 760 МПа), а со стороны стали уменьшаются примерно до HV 1150 МПа (микротвердость металла составляет около HV 1680...1700 МПа).

Формирующиеся в зоне сварки ФВ имеют преимущественно удлиненную форму и характерные размеры — толщину h от 5...170 мкм и длину $l = 10\ldots 1300$ мкм. Причем при количественной оценке объемного распределения фаз по размерам обнаруживается, что наибольшую объемную долю (около 27 % со стороны сплава алюминия и около до 37 % со стороны стали Ст3) составляют ФВ средней длины ($l \approx 500\ldots 900$ мкм), а объемная доля более дисперсных ($l \approx 10\ldots 300$ мкм) и наиболее крупных ($l \approx 1000\ldots 1300$ мкм) ФВ составляет соответственно 10...15 и 20...32 % общего

количества ФВ. При этом общая объемная доля ФВ равна со стороны сплава алюминия приблизительно 50...55 %, а со стороны стали Ст3 — приблизительно 70...82 %.

Характерно, что образующиеся фазы имеют сложную «композитную» структуру. Это хорошо просматривается на отдельных укрупненных структурных изображениях и фрагментах некоторых фаз (см. рис. 1, в, г). Соответственно микротвердость фазовых образований и составляющих их растущих фаз

Изменение содержания химических элементов (мас. %) в сварном соединении Ст3+АК4

L , мкм	Al	Fe	Si	Mg
0	97,7	0	1,6	0,7
50	98,0	0	1,4	0,6
100	98,3	0	1,0	0,6
120	98,1	0	1,3	0,6
140	98,1	0	1,3	0,6
160	98,4	0	1,2	0,3
180	92,8	6,1	0,9	0,2
200	77,1	22,7	0,2	0
220	67,2	32,7	0,1	0
250	70,5	29,4	0,1	0
280	61,8	38,2	0	0
300	50,5	48,6	0	0,9
330	38,6	61,4	0	0
350	51,5	48,5	0	0
380	63,5	36,5	0	0
400	29,4	70,6	0	0
430	39,3	60,7	0	0
450	58,9	41,1	0	0
470	8,1	91,9	0	0
500	0	100,0	0	0
530	0	100,0	0	0
560	0	100,0	0	0
600	0	100,0	0	0

Примечание. Углерод и кислород отсутствуют.

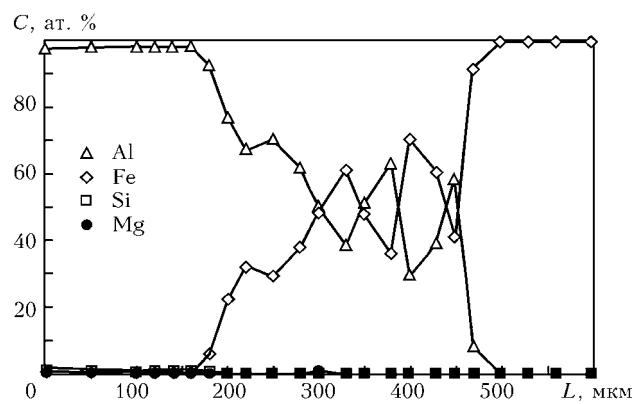


Рис. 4. Изменение содержания С химических элементов в сварном соединении Ст3+АК4, полученном КСС оплавлением на I режиме: L — длина исследуемого участка



отличается весьма значительно. Так, в локальных участках «композитных» фаз и отдельных фазах она изменяется от HV 2400...2800 до HV 6400...9300 МПа. На основании данных ряда локальных измерений содержания химических элементов в каждой из наблюдаемых фаз и различных ее фрагментах по всей зоне сварки на разных расстояниях от поверхности контакта свариваемых металлов был определен конкретный состав формирующихся фаз.

Из рис. 3, а видно, что стехиометрический состав фаз, формирующихся в определенном участке зоны сварки, преимущественно соответствует фазам типа Al_3Fe и Fe_3Al , в других участках сварного соединения обнаружены фазы типа $FeAl_2$.

Проведены также исследования на предмет наличия оксидных пленок в участках скопления ФВ (см. рис. 4). Подробный анализ содержания химических элементов, включая кислород (таблица), показал отсутствие оксидов в исследуемых областях с интерметаллидными фазами.

Для соединений, выполненных на более длительных режимах КСС (II режим), наиболее резкое из-

менение содержание железа в сторону алюминия от 20 (у границы) до 7 мас. % наблюдается на расстоянии приблизительно до 5 мкм от поверхности раздела, оно плавно снижается до 0,37 мас. % (на расстоянии до 100 мкм). Основные изменения содержания алюминия (более резко от 2,0 до 0,8 мас. %, затем с затуханием до 0,4 мас. %) происходят на глубине соответственно $\delta \cong 5$, 20 и 100 мкм от поверхности раздела (см. рис. 3, б). Увеличение продолжительности сварки по сравнению с I режимом способствует также значительному увеличению объемной доли и размеров ФВ в зоне сварки (см. рис. 5). Объемная доля ФВ составляет приблизительно 93...94 % со стороны сплава алюминия и 80...82 % со стороны стали Ст3.

В этом случае толщина ФВ достигает около 10...200 мкм при их длине 20...2500 мкм, а микротвердость ФВ составляет HV 2900, 4700, 5900 МПа. Однако со стороны стали Ст3 ФВ имеют более дисперсный характер ($h \cong 5 \dots 220$ мкм; $l \cong 90 \dots 1340$ мкм), их микротвердость ниже — приб-

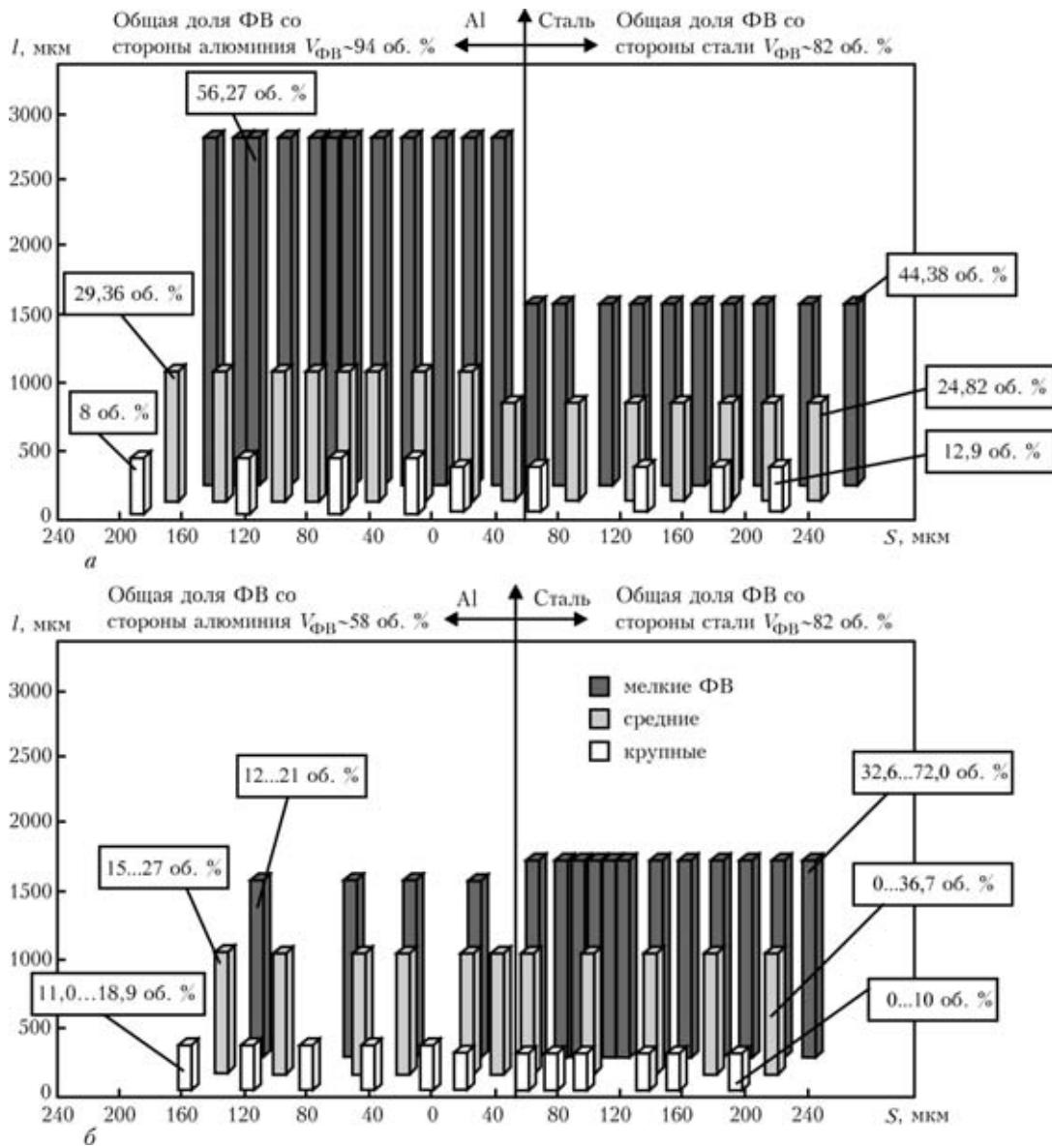


Рис. 5. Объемная доля ФВ в сварном соединении АК4+Ст3, полученном КСС непрерывным оплавлением на I (а) и II (б) режимах

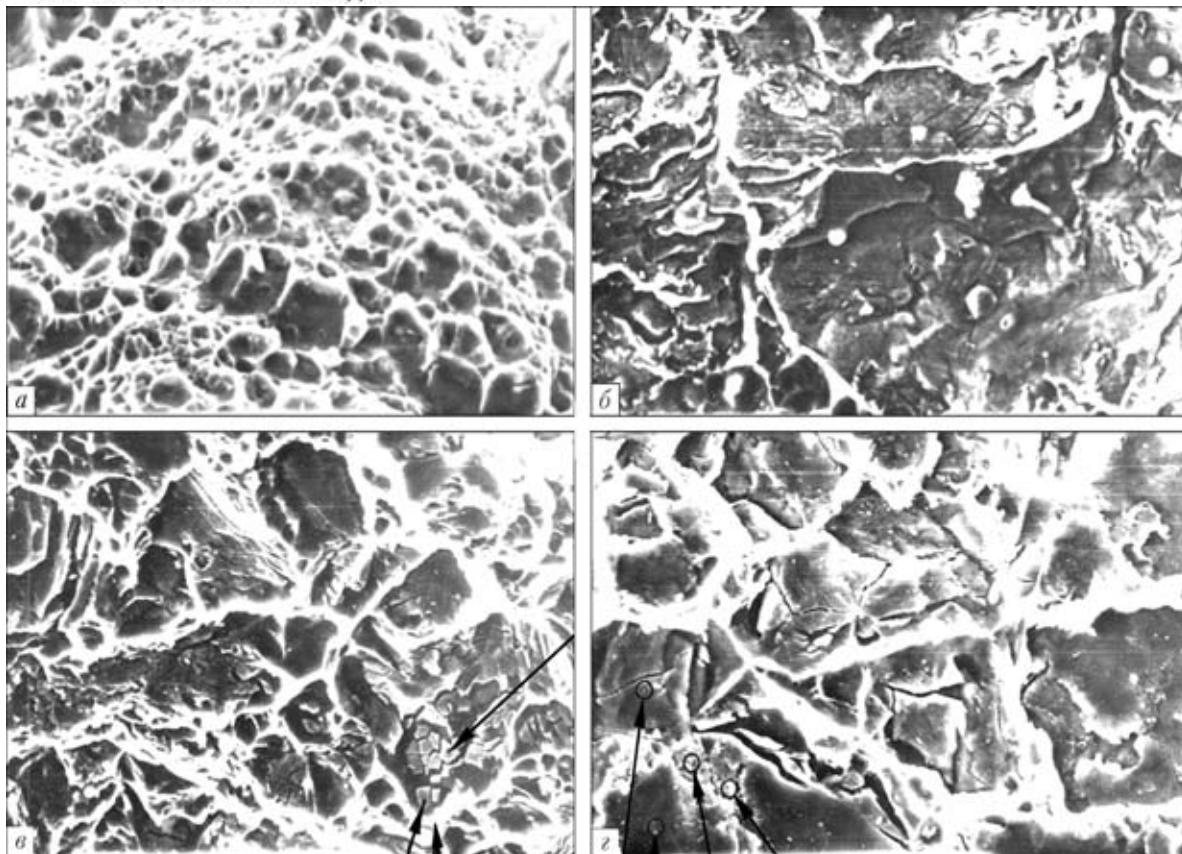


Рис. 6. Микроструктура излома сварного соединения Ст3+АК4 со стороны алюминия, полученного КСС непрерывным оплавлением на I (a, в, $\times 680$) и II режимах (б, $\times 300$; г, $\times 680$)

лизительно HV 2400...2860 МПа. Стехиометрический состав ФВ — преимущественно Fe_3Al (со стороны стали) и типа Al_3Fe , $FeAl$ (со стороны алюминиевого сплава). Следует подчеркнуть, что

состав интерметаллидных образований при этом сохраняется практически аналогичным составу фаз, формирующихся при I режиме. Однако, кроме наблюдаемого при более кратковременном режиме

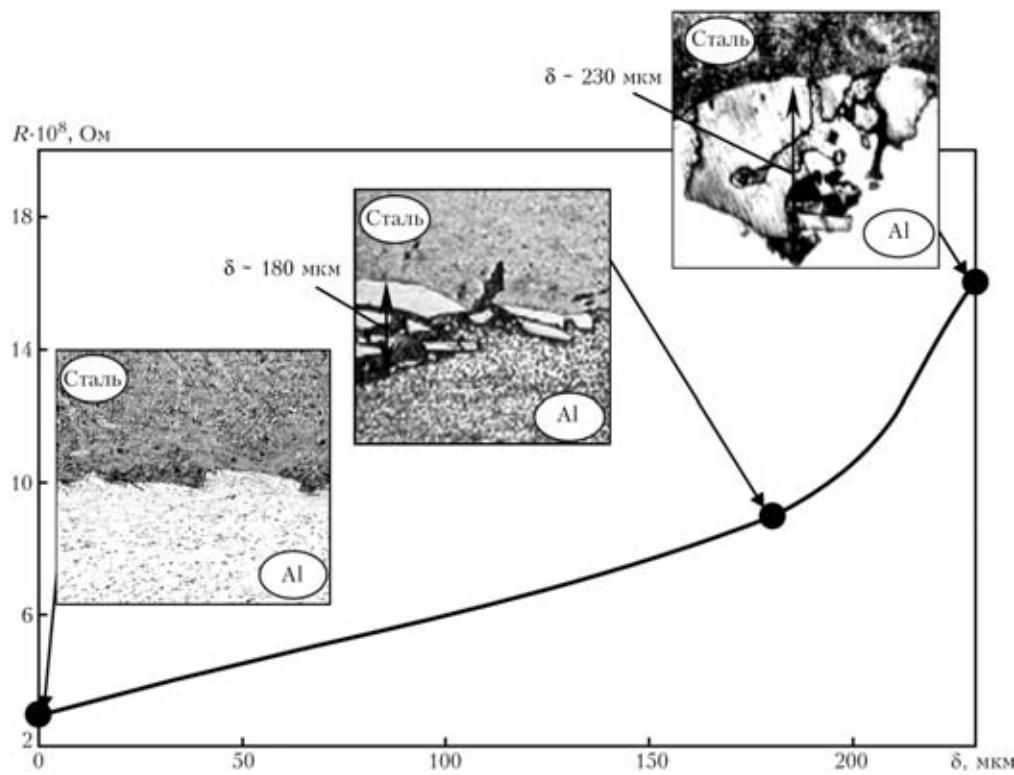


Рис. 7. Зависимость локального сопротивления переходной зоны сварного соединения Ст3+АК4, полученного КСС непрерывным оплавлением от размера D и объемной доли ФВ

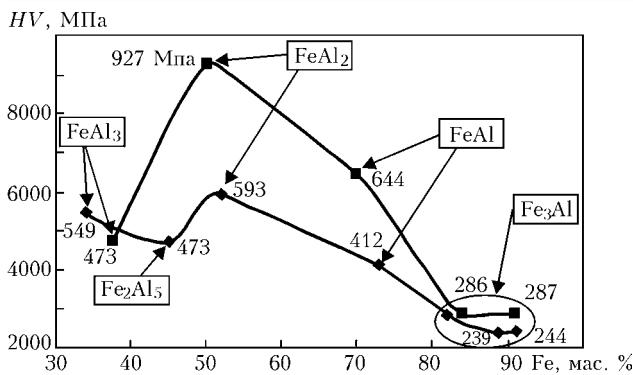


Рис. 8. Зависимость микротвердости интерметаллидов от их стехиометрического состава: ■, ◆ — соответственно I и II режимы

формирования интерметаллидных фаз типа Al_3Fe , Fe_3Al и FeAl_2 , установлено наличие фаз более разнообразных составов, включая такие, как FeAl , Fe_2Al_5 , и превалирование фаз с более сложным морфологическим (композитным) строением, что явно просматривается на укрупненных изображениях таких фаз (см. рис. 2, б-г). Наблюдается также увеличение объемной доли интерметаллидов, отличающихся более высокими значениями твердости (HRC 400, 500, 600), что обнаруживается, как правило, со стороны сплава алюминия.

В структурах фазовых образований такого типа (интерметаллиды типа FeAl_3) с микротвердостью приблизительно HV 600 МПа (см. рис. 2, в) хорошо различимы сетки внутренних микротрещин. Заметны также изменения структуры и микротвердости свариваемых материалов в приконтактной зоне (см. рис. 2, в, г), обусловленные формированием слоев микroneоднородностей: сегрегационных скоплений, фрагментации структуры и высоких градиентов микротвердости, которая скачкообразно изменяется от HV 800 до 4000...6000 МПа.

Как видно из приведенных результатов, при более продолжительном режиме (II) КСС сплошных заготовок сталеалюминиевых соединений вдоль линии сплавления примерно вдвое увеличивается количество фазовых образований по сравнению с таковыми в случае более кратковременного I режима. Причем превалируют интерметаллидные фазы более крупных размеров (см. рис. 5), что обусловлено увеличением длительности процесса сварки, способствующего более активному зарождению и росту интерметаллидных фаз. Следует отметить, что формирующиеся при этом фазы имеют более равновесный (устойчивый) стехиометрический состав и значительно более высокую твердость и хрупкость.

Фрактографические исследования характера разрушения сварных соединений (см. рис. 6) показали, что при использовании I режима поверхность разрушения отличается более вязким рельефом (см. рис. 6, а): формируются типичные ячейки, высота стенок которых свидетельствует о значительном течении металла перед разрушением. Вязкий характер разрушения, как правило, обнаруживается в зонах сварки, где металл находится в виде твердого раствора при отсутствии фазовых образований, либо в том случае, когда в твердом растворе,

например алюминия с железом, фиксируется существенное уменьшение содержания железа (приблизительно до 0,5...5,0 мас. %). Квазихрупкий характер разрушения в основном связан с формированием мелкодисперсных интерметаллидных фаз, либо фаз типа Fe_3Al , имеющих минимальную микротвердость (приблизительно HV 2400...2700 МПа). Образование участков хрупкого скола в основном провоцируется наличием в зоне сварки хрупких, имеющих высокую твердость интерметаллидов типа FeAl_3 , FeAl_2 , FeAl (приблизительно HV 4000...6000 и более 9000 МПа), что подтверждено микрорентгеноспектральным анализом составляющих излома. На рис. 8 представлена взаимосвязь влияния состава интерметаллидных фаз с их микротвердостью. Разброс значений микротвердости фаз, например HV 9270 и 5930 МПа (для FeAl_2) и HV 5490 и 4730 МПа (для FeAl_3), как правило, связан с формированием композитного состава интерметаллидных образований, компоненты которых могут изменять микротвердость более чистых по составу фаз.

Для I режима КСС непрерывным оплавлением характерно преимущественно вязкое разрушение причем с вырывом металла по алюминию, что подтверждает концентрационный состав металла в зоне ячеистой структуры излома.

Сравнительный анализ вида изломов соединений алюминия со сталью, полученных КСС непрерывным оплавлением при использовании I и II режимов, показал, что в последнем случае механические свойства соединений ниже. В поверхностях разрушения превалируют элементы хрупкого скола, речного узора, указывающего направление образования и распространения трещин. Анализ химического состава отдельных фрагментов картины разрушения свидетельствует о том, что фасетки скола, как правило, связаны с наличием в этой области интерметаллидных фаз $\text{Fe}+\text{Al}$: FeAl , FeAl_3 , Fe_3Al , FeAl_2 , Fe_2Al_5 . Компоненты вязкого разрушения соответствуют зонам с явным преобладанием алюминия либо алюминия с существенно уменьшенным содержанием железа (0,5...5,0 мас. %).

Испытания на растяжение показали, что прочность сварных соединений при использовании II режима находится на уровне 280...300 МПа, а полученных при использовании I режима — 300...322 МПа.

Измерения электросопротивления R на локальных участках, проведенные вдоль зоны сварки сталеалюминиевых соединений, выполненных на различных режимах КСС, показали следующее. Изменение значений электросопротивления непосредственно в зоне контакта имеет четкую взаимосвязь с наличием в этой зоне фазовых образований и их размерностью. Так, вдоль линии сплавления, свободной от фазовых образований, электросопротивление составляет $R \geq 3 \cdot 10^{-8}$ Ом, а при наличии фазовых образований его значения увеличиваются приблизительно в 3...5 раз ($R \geq 9 \dots 16 \cdot 10^{-8}$ Ом). Причем, если при размерах (толщине) фаз около 180 мкм $R \geq 9 \cdot 10^{-8}$ Ом, то с увеличением их размеров фаз оно возрастает до $16 \cdot 10^{-8}$ Ом (см. рис. 7).



Как видно из приведенных результатов исследований, количество и размеры интерметаллидных фаз, формирующихся в зоне сварки сталя-алюминиевых соединений, возрастают при КСС по мере увеличения продолжительности сварки. Фазовые образования имеют сложное неоднородное по составу строение и в некоторых случаях представляют собой образования композитного типа, состоящие из слоев различного стехиометрического состава. При этом для фаз определенного состава характерны различные (иногда существенно отличающиеся) значения микротвердости. Так, наибольшую твердость имеют фазы типа FeAl_2 (до HV 9000 МПа), FeAl_3 (до HV 5500 МПа), а наименьшую — Fe_3Al (до HV 2800 МПа) и Fe_2Al_5 (до HV 4800 МПа), температуры образования которых составляют соответственно 1140, 655, 555, 1153 °C [5–9].

Учитывая, что наиболее охрупчивающее влияние на характер разрушения могут оказывать интерметаллидные фазы, имеющие более высокую микротвердость, по-видимому, при выборе температурно-временных параметров сварки целесообразно избегать использование сварочных температур, близких температурам зарождения наиболее хрупких и твердых фаз, либо применять высокие скорости нагрева и охлаждения, при которых рост таких фаз будет ограничен.

Выводы

1. Использование кратковременных (время сварки 4 с) режимов КСС непрерывным оплавлением сплошных заготовок способствует формированию вдоль зоны сварки фазовых образований типа FeAl , Fe_3Al и FeAl_2 , объемная доля которых составляет около 50 % (со стороны сплава алюминия) и около 70 % (со стороны стали Ст3), и области твердого раствора, объемная доля которого равна приблизительно 30...40 %. Разрушение сварного соединения имеет преимущественно квазихрупкий и вязкий характер, прочность соответствует 300...322 МПа.

2. При длительном режиме сварки (время сварки 8 с) вдоль линии сплавления примерно

вдвое возрастает количество фазовых образований, превалируют интерметаллидные фазы более крупных размеров с более равновесным стехиометрическим составом (преимущественно Al_3Fe) и значительно более высокой микротвердостью (до HV 4000...6000 МПа), а соответственно и хрупкостью. Механические свойства соединений снижаются, их прочность составляет 280...300 МПа.

3. При выборе температурно-временных параметров сварки необходимо избегать использования сварочных температур, близких температурам зарождения наиболее хрупких и твердых фаз, либо использовать высокие скорости нагрева и охлаждения, при которых рост таких фаз будет ограничиваться.

4. Увеличение объемной доли, плотности и глубины зоны фазообразования в зоне сварки сталя-алюминиевых соединений способствует возрастанию локальных значений электросопротивления: в зоне более крупных по размеру фаз и их скоплений и в области образования мелкодисперсных фаз и твердого раствора значения электросопротивления изменяются соответственно от $16 \cdot 10^{-8}$ до $9 \cdot 10^{-8}$ и $3 \cdot 10^{-8}$ Ом.

5. Показано, что при исследуемых режимах КСС оплавлением полностью исключить образование интерметаллидных фаз в зоне сварки не удается.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактнаястыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
2. Гельман А. С. Основы сварки давлением. — М.: Машиностроение, 1970. — 312 с.
3. Механические свойства металлов и сплавов: Справочник / Л. В. Тихонов, В. А. Кононенко. — Киев: Наук. думка, 1985. — 569 с.
4. Рябов В. Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
5. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем: В 4 т. — М.: Физматгиз, 1962. — Т. 2. — 983 с.
6. Карапов Н. Н., Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ. — М.: Машиностроение, 1960. — 216 с.
7. Хансен М. Структуры бинарных сплавов. — М.: Машгиз, 1941. — Т. 1–2. — 1050 с.
8. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. — М.: Физматгиз, 1958. — Т. 1. — 556 с.
9. Шанд Ф. А. Структуры двойных сплавов. — М.: Металлургия, 1973. — 760 с.

Considered are the regularities of the processes of phase formation in steel-aluminium joints, produced by resistance flash-butt welding, and their influence on service and mechanical characteristics of joints.

Поступила в редакцию 05.02.2004



УДК 621.791.76:621.7.044.2

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ

**А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, И. В. ПЕНТЕГОВ, доктора техн. наук, Е. П. СТЕМКОВСКИЙ, д. А. ШЕЙКОВСКИЙ,
В. М. КИСЛИЦЫН, кандидаты техн. наук (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)**

Предложен метод расчета режимов магнитно-импульсной сварки, сочетающий аналитический способ расчета и числовые методы с использованием ПЭВМ. Применение данного метода расчета позволяет с достаточной точностью для практики рассчитывать параметры магнитно-импульсной сварки и выбирать оптимальные режимы сварки.

Ключевые слова: магнитно-импульсная сварка, метод расчета, оптимальные режимы сварки

Магнитно-импульсная сварка (МИС) основана на преобразовании части электрической энергии заряда батареи конденсаторов в механическую, причем импульс давления при воздействии магнитного поля прикладывается к деталям без какой-либо промежуточной среды. Образование сварного соединения при МИС характеризуется интенсивным протеканием процессов взрывного типа.

При МИС в течение короткого промежутка времени происходит разряд батареи конденсаторов на индуктор, генерация сильного электромагнитного поля и образование индуцированных полей вихревых токов в метаемой детали, взаимодействие этих полей и движение метаемой детали в направлении неподвижной трубы, соударение и сварка соединяемых поверхностей. Ввиду многообразия процессов, происходящих при МИС, рассчитывать оптимальные режимы сварки для конкретных деталей весьма затруднительно из-за сложности математического описания задач со многими параметрами и решения нелинейных уравнений.

В настоящее время в связи с совершенствованием ПЭВМ и наличием необходимого программного обеспечения в подобных сложных случаях целесообразно использовать аналитические методы анализа процессов в сочетании с численными методами расчета.

Цель настоящей работы — использовать преимущества такой методики на примере расчета процессов, происходящих при МИС труб.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай протекания электрического тока через массивный кольцевой индуктор, когда на последний разряжается предварительно заряженная батарея конденсаторов [1], что в настоящее время применяется во всех известных источниках питания для МИС. В источнике питания (рис. 1) имеется батарея конденсаторов C , значения емкости которой для конкретной сварочной машины постоянные. При сварке батарея конденсаторов C заряжается до номинального напряжения U_{C_n} , после чего через коммутатор K разряжается на индуктор.

Значения U_{C_n} можно изменять в широких пределах.

При МИС используют колебательный режим разряда батареи конденсаторов. Закон изменения разрядного тока в этом случае удобно записать в виде функции безразмерного параметра γ , как это приведено в работе [2]:

$$i(t) = \frac{2U_{C_n}}{\gamma R} e^{-\delta t} \sin \omega t; \quad \gamma = \sqrt{\frac{4L}{CR^2}} - 1; \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \delta \gamma; \quad \delta = \frac{R}{2L}.$$

Параметры разрядного контура машины C , R и L принимают постоянными во времени и неизменными в процессе сварки. Для параметра L это условие выполняется при сварке труб малого диаметра, когда суммарная индуктивность разрядного контура меняется незначительно за время проleta $t_{\text{пр}}$ метаемой трубы. Полагаем также, что начало движения детали (трубы) практически совпадает с началом импульса тока (момент времени $t = 0$).

Максимальный ток разряда определяется по формуле

$$I_{\max} = U_{C_n} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\delta t_{\max}}; \quad t_{\max} = \frac{\arctg \gamma}{\omega},$$

где t_{\max} — время достижения максимального тока.

Следует отметить, что максимальная скорость нарастания разрядного тока наблюдается в начале

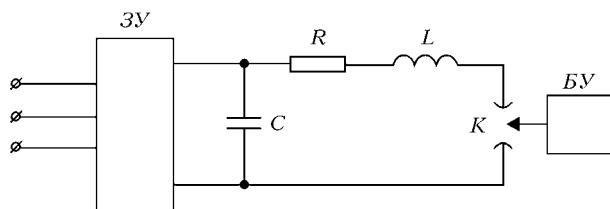


Рис. 1. Электрическая схема источника питания для МИС: ЗУ — зарядное устройство; R — активное сопротивление разрядного контура, включающее сопротивление метаемой трубы; L — индуктивность разрядного контура, включающая индуктивность магнитно-связанных индуктора и свариваемых деталей; БУ — блок управления (остальные обозначения см. в тексте)

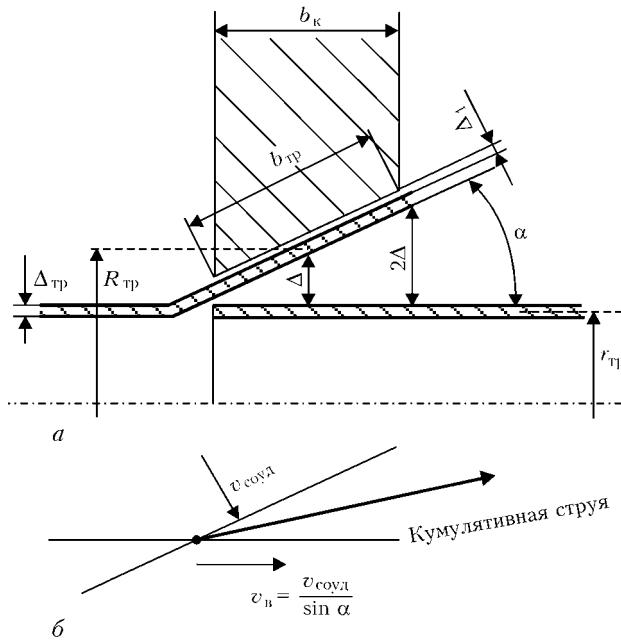


Рис. 2. Схемы реализации МИС при метании деформируемого участка трубы (а) и возникновения кумулятивной струи (б): r_{tp} — средний радиус исходной трубы-заготовки; R_{tp} — средний радиус развалцованный участок метаемой трубы в зоне сварки; Δ_{tp} — толщина стенки метаемой трубы; Δ_1 — среднее значение зазора между соединяемыми трубами; Δ — среднее значение зазора между индуктором-концентриатором и трубой; α — угол развалцовки трубы; b_{tp} — ширина нахлеста (остальные обозначения см. в тексте)

разряда батареи конденсаторов, когда $(di/dt)_{max} = U_C/L$ [3].

На рис. 2 приведены схемы процесса МИС при метании деформируемого участка трубы.

Обычно индуктор-концентриатор с шириной рабочего участка b_k имеет конусность с тем же углом α . С учетом выражения $\Delta = (b_{tp}/2)\sin \alpha$ средний радиус трубы после развалцовки определяется по формуле

$$R_{tp} = r_{tp} + \Delta + \Delta_{tp} = r_{tp} + (b_{tp}/2)\sin \alpha + \Delta_{tp}. \quad (1)$$

Из выражения (1) выводим коэффициент k_{tp} , учитывающий изменение радиуса метаемой трубы после развалцовки:

$$k_{tp} = (R_{tp}/r_{tp}) = 1 + [(\Delta + \Delta_{tp})/r_{tp}].$$

На практике для расчетов режимов сварки используют в качестве заданных рекомендуемые диапазоны значений некоторых параметров, которые получают экспериментально для различных металлов: это фронтальная скорость соударения v_{coud} , скорость движения волны соударения (точки схождения) v_b и угол соударения α трубы [1]. Если для данного соединения обеспечить достижение этих параметров путем изменения электрических параметров силового контура машины для МИС, можно гарантировать стабильное воспроизведение процесса сварки.

Рассмотрим процессы, происходящие при разряде батареи конденсаторов на электромагнитный индуктор в случае МИС. Масса метаемого развалцованный участка трубы составляет

$$m = 2\pi r_{tp} \Delta_{tp} \gamma_{tp} b_{tp}$$

где γ_{tp} — удельная масса материала метаемой трубы.

Площадь поверхности S воздействия магнитного поля на метаемую трубу можно записать в следующем виде:

$$S = 2\pi R_{tp} b_{tp},$$

здесь и далее $b_{tp} = b_k/\cos \alpha$ (рис. 2).

Сила, приложенная к рабочему участку метаемой трубы в интервале времени пока не происходит просачивание магнитного поля через стенку трубы, определяется по формуле

$$F = SB^2/\mu_0,$$

где B — среднее значение индукции магнитного поля в зазоре между индуктором и метаемой трубой; μ_0 — магнитная постоянная.

При этом ускорение метаемой детали в срединной ее части равно

$$a = F/m = B^2/(\mu_0 \Delta_{tp} \gamma_{tp}) = \\ = [\mu_0 w^2 K_R^2 / \Delta_{tp} \gamma_{tp} b_{tp}^2] (k_{tp}/\cos \alpha) i(t)^2.$$

По закону полного тока

$$Bb_{tp}/(\mu_0 K_R) = iw,$$

где K_R — коэффициент Роговского, $K_R = 1 - \frac{\Delta_1}{\pi b_{tp}}(1 - \exp[-\pi(b_{tp}/\Delta_1)])$; i — ток, проекающий через индуктор; w — количество витков индуктора (в нашем случае $w = 1$).

Отсюда определяется индукция в рабочей зоне:

$$B(t) = (\mu_0 w K_R / b_{tp}) i(t).$$

Текущая скорость метаемой трубы в срединной ее части находится по формуле

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt,$$

а скорость метаемой трубы в ее срединной части в момент соударения составляет

$$v_{coud} = \int_0^{t_{ip}} a(t) dt = \frac{w^2 \mu_0 K_R^2}{b_{tp}^2 \Delta_{tp} \gamma_{tp}} \frac{k_{tp}}{\cos \alpha} \int_0^{t_{ip}} i(t)^2 dt.$$

В этот момент скорость соударения должна быть такой, чтобы удовлетворять значению этого параметра, полученного экспериментальным путем для данного материала метаемой трубы [1].

Среднее время пролета трубы t_{ip} определяем из следующего уравнения при условии, что путь, пройденный срединной частью метаемой трубы, равен среднему значению зазора Δ между соударямыми трубами (рис. 2):

$$\Delta = \int_0^{t_{ip}} v dt = \frac{w^2 \mu_0 K_R^2}{b_{tp}^2 \Delta_{tp} \gamma_{tp}} \frac{k_{tp}}{\cos \alpha} \int_0^{t_{ip}} \left[\int_0^t i(t)^2 dt \right] dt. \quad (2)$$



Если известно значения Δ , то, решая уравнение (2), находим $t_{\text{пп}}$.

Для рассматриваемого случая уравнение (2) относительно $t_{\text{пп}}$ аналитическим путем не решается. Однако для конкретной задачи численным методом с помощью программы ПЭВМ, например MathCAD, среднее время пролета $t_{\text{пп}}$ метаемой трубы находится из уравнения

$$t_{\text{пп}} = \text{root} \left[\Delta - \frac{\mu_0 K_R^2}{b_{\text{тр}}^2 \Delta_{\text{тр}} \gamma_{\text{тр}}} \frac{k_{\text{тр}}}{\cos \alpha} \int_0^x \left(\int_0^t i(t)^2 dt \right) dt, x \right].$$

При известных значениях $t_{\text{пп}}$ для конкретной задачи можно определить необходимые расчетные параметры режима сварки.

Условная кинетическая энергия $W_{\text{к}}$ (условность состоит в том, что на самом деле разные участки метаемой трубы соударяются с неподвижной трубой с разными скоростями и в разное время) при метаемой массе m составляет

$$W_{\text{к}} = (mv_{\text{сoud}}^2)/2. \quad (3)$$

Значения условного КПД сварочной цепи при сварке одной детали определяется из выражения

$$\eta = 2W_{\text{к}} / CU_{C_{\text{н}}}^2. \quad (4)$$

Скорость звука в жидкости (в гидродинамической ударной волне) для металла заготовки составляет

$$v_{\text{зв}} = (E_{\text{т}}/\gamma_{\text{тр}})^{1/2},$$

где E — модуль упругости свариваемого металла.

Скорость движения волны соударения $v_{\text{в}}$ — точки скрещения при метании трубы под углом α (см. рис. 2) для получения качественной сварки должна быть меньше $v_{\text{зв}}$. Она определяется по формуле

$$v_{\text{в}} = v_{\text{сoud}} / \sin \alpha.$$

Как показала практика, для получения качественных сварных соединений способом МИС необходимо соблюдать определенные значения $v_{\text{сoud}}$ и $v_{\text{в}}$, приведенные в табл. 1 [1].

Исходя из существующих в настоящее время представлений [1] нижняя граница скорости соударения $v_{\text{сoud}}$ определяется условиями образования кумулятивной струи (см. рис. 2), причем при значении $v_{\text{сoud}}$ меньше значений нижней ее границы сварное соединение не образуется, а осуществляется только опрессовка деталей. При значениях скоростей соударения $v_{\text{сoud}}$ и волны соударения $v_{\text{в}}$, превышающих верхние границы (табл. 1), об разуются дефекты сварного соединения. Это обусловлено следующими факторами: во-первых, возникновением разрывов и трещин в сваренном металле из-за воздействия мощных звуковых волн на сварной шов при скорости волны соударения, превышающей скорость звука; во-вторых, наличием в металле сварного соединения оксидных пленок и других примесей из-за того, что последние не успевают выйти из зоны сварки вместе с ку-

Таблица 1. Скорости соударения и волны соударения для различных материалов

Металл/сплав	$v_{\text{сoud}}$, м/с	$v_{\text{в}}$, км/с
Алюминий	240...380	1,90...2,58
Медь	450...480	1,59...1,97
Бронза	Около 400	2,12...3,24
Латунь	460...520	1,77...3,14

мулятивной струей вследствие «схлопывания» зазора между соединяемыми поверхностями труб. Среднее значение скорости соударения определяет среднее время пролета $t_{\text{пп}}$ метаемой трубы. При метании последней под углом α на участке шириной $b_{\text{к}}$ будет наблюдаться некоторый интервал времени, в течение которого значения $v_{\text{сoud}}$ удовлетворяют условиям получения качественного сварного соединения, что определяет ширину сварного шва, выполненного способом МИС.

Для обеспечения высокого качества сварки необходимо также поддерживать определенное значение давление магнитного поля в момент соударения деталей (осадка). Мгновенное значение этого давления при сварке определяется из выражения

$$P(t) = B(t)^2 / \mu_0.$$

Давление магнитного поля в момент соударения деталей соответствует $t_{\text{пп}}$

$$P_{\text{сoud}} = P(t_{\text{пп}}).$$

Ниже приведены расчеты для двух конкретных режимов сварки алюминиевых труб. Заданными считаем геометрические параметры метаемой трубы и зоны сварки: ширину зоны сварки; средний зазор между внутренней трубой и метаемой заготовкой Δ ; зазор между индуктором и метаемой заготовкой Δ_1 ; толщину и радиус метаемой трубы $r_{\text{тр}}$ до раздельцовки; угол соударения трубы α .

Известными полагаются некоторые физические параметры, характерные для процессов, происходящих при МИС, например абсолютная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, коэффициент Роговского K_R [4], плотность $\gamma_{\text{тр}}$ и удельное электрическое сопротивление металла трубы ρ , модуль упругости E [5].

Варьируемыми являются электрические параметры процесса — активное суммарное сопротивление разрядного контура R , суммарная индуктивность разрядного контура L (принимается в расчетах постоянной величиной, для случая, когда индуктивность зоны метаемой заготовки составляет незначительную долю от L), напряжение заряда накопителя $U_{C_{\text{н}}}$, энергия накопителя $W_{\text{н}}$, скорость нарастания тока в начале разряда di/dt . Параметры МИС рассчитывали и для случая использования одновиткового индуктора-концентратора.

Для этого проверяли выполнение неравенства

$$t_m = (\mu_0 \Delta_{\text{тр}} \Delta) / \rho > t_{\text{пп}},$$

где t_m — время проникновения магнитного поля сквозь метаемую трубу, а также соблюдения тре-



Таблица 2. Расчетные параметры МИС

Диаметр трубы, мм	W_n , кДж	$L \cdot 10^5$, мГн	R , мОм	C , мкФ	U_{C_n} , кВ	$\rho_{Al} \cdot 10^8$, Ом·м	$E_{Al} \cdot 10^{-9}$, Па	γ_{Al} , кг/м ³	dr/dt , кА/м
12	1,30	3,0	2,60	100	5,1	3,4	65	2700	170
20	1,57	3,3	2,74	100	5,6	3,4	65	2700	170

Продолжение табл. 2

Диаметр трубы, мм	I_{max} , кА	B_{max} , Тл	$P_{согд}$, Па	$v_{зв}$, км/с	$v_{согд}$, м/с	v_b , км/с	t_m , мкс	$t_{пр}$, мкс	η , %
12	263	16,1	$6,0 \cdot 10^7$	4,91	243	2,32	59,875	9,5	5,50
20	275	16,9	$1,3 \cdot 10^8$	4,91	255	2,44	59,875	9,0	8,83

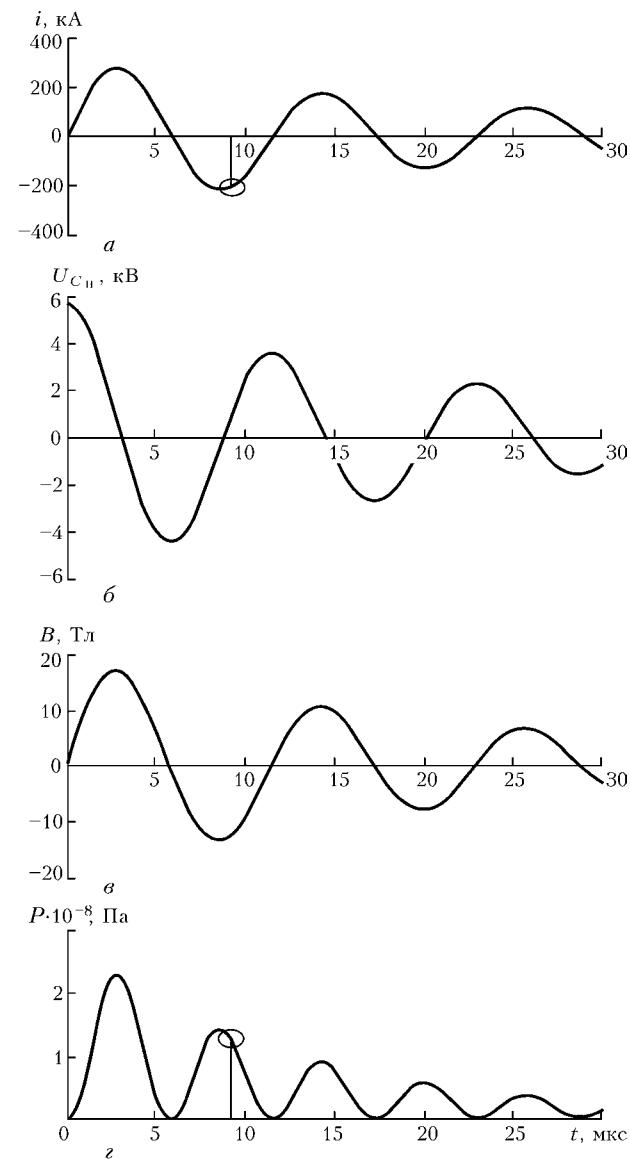


Рис. 3. Расчетные мгновенные значения параметров МИС: *а* — разрядный ток $i(t)$; *б* — напряжение на батарее конденсаторов $U_{C_n}(t)$; *в* — магнитная индукция в рабочем зазоре $B(t)$; *г* — магнитное давление $P(t)$; кружками отмечен момент соударения труб и окончания сварки

буемых диапазонов скорости соударения свариваемых деталей, приведенных в табл. 1 [1].

С помощью указанных расчетов определяли скорость волны соударения, причем энергетические режимы рассчитывали таким образом, чтобы при нор-

мальном прохождении процесса МИС она была меньше скорости звука в жидкости, т. е. должно выполняться неравенство $v_b < v_{зв}$. Диапазон этих скоростей также приведен в табл. 1 [1].

Поскольку величины C , L , R постоянные, то для того, чтобы соблюдать диапазоны границ приведенных выше условий, необходимо подбирать значения U_{C_n} .

Для конечной оценки вычисляли скорости соударения деталей $v_{согд}$ и движения волны соударения v_b — критериальные параметры, рекомендуемые значения которых необходимо обеспечить для получения качественного сварного соединения [1]. Кроме того, подсчитывали среднее время пролета метаемой детали $t_{пр}$ и проникновения магнитного поля сквозь метаемую деталь t_m таким образом, чтобы выполнялось неравенство $t_m > t_{пр}$. Если для данного соединения обеспечивается получение этих критериальных параметров, то можно гарантировать стабильное воспроизведение процесса сварки.

Расчеты проводили для алюминиевых труб со следующими геометрическими параметрами: толщина метаемой трубы — 1,35 мм; начальный средний зазор между внутренней трубой и метаемой — 1,2 мм; начальный зазор между индуктором и метаемой трубой — 1,5 мм.

Значения основных расчетных параметров для двух вариантов сварки труб с диаметрами метаемых труб 12 и 20 мм приведены в табл. 2. Во всех случаях принимали $\alpha = 6^\circ$, а условный КПД рассчитывали по формулам (3), (4).

На рис. 3 приведены расчетные мгновенные значения параметров режима МИС в случае метаемой трубы диаметром 20 мм. Кривые на рис. 3 по характеру изменения параметров аналогичны полученным для метаемой трубы диаметром 12 мм.

Анализируя результаты расчетов, приведенные в табл. 2, следует обратить внимание на следующие обстоятельства: при МИС трубы диаметром 12 мм время пролета составляет $t_{пр} = 9,5$ мкс (1,75 полупериода тока), а диаметром 20 мм — $t_{пр} = 9,0$ мкс (1,5 полупериода тока), причем время проникновения магнитного поля сквозь метаемую деталь одинаково для обоих случаев и равно 60 мкс; при сварке крупной детали диаметром трубы 20 мм условный КПД больше ($\eta = 8,83\%$), чем при сварке детали, имеющей диаметр трубы 12 мм ($\eta = 5,50\%$).

В случае сварки труб большого диаметра, чтобы скорость соударения свариваемых деталей и скорость



волны находились в допустимом диапазоне, напряжение зарядки батареи конденсаторов должно быть выше, чем при сварке труб меньшего диаметра. При этом увеличиваются индуктивность и активное сопротивление разрядного контура сварочной машины, что приводит к уменьшению частоты колебательного разряда батареи конденсаторов.

Таким образом, предложенная методика расчета позволяет с достаточной для практики точностью рассчитывать параметры МИС и выбирать оптимальные режимы сварки.

A method is proposed to calculate the modes of magnetic-pulse welding, which combines the analytical method of calculation and numerical methods, using a PC. Application of this method allows calculation of the parameters of magnetic-pulse welding and selecting the optimum welding modes with an accuracy sufficient for practical purposes.

1. Дудин Д. А. Магнитно-импульсная сварка металлов. — М.: Металлургия, 1979. — 128 с.
2. Пешегов И. В., Стемковский Е.П., Шейковский Д. А. Параметрическая стабилизация режимов конденсаторной сварки сопротивлением // Автомат. сварка. — 1971. — № 10. — С. 13–15.
3. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
4. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.
5. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. — М.: Физматгиз, 1962. — 248 с.

Поступила в редакцию 17.02.2004,
в окончательном варианте 19.02.2004

Разработано в ИЭС



ЛАБОРАТОРИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (аттестат аккредитации в системе УкрСЕПРО № UA 6.001.Т.305 от 08.05.2002)

Назначение:

- проводит сертификационные испытания в соответствии с требованиями аккредитации в системе УкрСЕПРО;
- ведет самостоятельные разработки и оказывает услуги при выполнении научно-исследовательских работ заказчика;
- проводит определение малоцикловой усталости образцов в мягком и жестком режимах при разных значениях асимметрии цикла;
- проводит оценку многоцикловой усталости при растяжении, сжатии и изгибе;
- определяет механические свойства материалов и сварных соединений;
- выполняет исследования механики разрушения и трещиностойкости материалов;
- проводит испытания по оценке ударной вязкости КСУ и КСВ на стандартных образцах;
- выполняет высокочастотную механическую проковку зоны сварного соединения элементов металлоконструкций с целью повышения их сопротивления усталости.

Оснащение:

- гидравлическая машина ЦДМ-10пу;
- универсальные гидравлические машины УРС 20/6000, УРС 200/20, "Шенк";
- универсальные электрогидравлические машины УЭ-10, УЕ-50, МП-800;
- универсальная механическая машина УМЕ-10;
- испытательная электромеханическая машина 2054 Р-5;
- маятниковый копер 2130 КМ-0,3;
- испытательная машина МР-500.

Имеет широкий каталог стандартных образцов.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
ИЭС им. Е. О. Патона. Тел.: (38044) 227 60 05;
факс: (38044) 261 04 86; e-mail: knyshj@paton.kiev.ua



АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ Al_2O_3 , ПРИМЕНЯЕМОГО В СУДОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Е. А. АСТАХОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты антифрикционных и коррозионных испытаний детонационного покрытия из Al_2O_3 в однородной паре и паре с высокооловянной бронзой в воде, в том числе с добавлением консистентной смазки, а также после длительных сравнительных испытаний в паре с капролоном. Установлена удовлетворительная работоспособность образцов, имитирующих работу подшипников узла опоры баллера руля.

Ключевые слова: детонационное покрытие, оксид алюминия, коррозионные свойства, пары трения, удельное давление, коэффициент трения, антифрикционные свойства

Жизненно важными, обеспечивающими эксплуатационную надежность и безопасность плавания судов, являются устройства винторулевого комплекса — рулевые, дейдвудные, гребные валы и винты [1]. В связи с этим выбор материала покрытия для замены бронзовых облицовок на валопроводах, обеспечивающего повышение ресурса подшипникового узла и, как следствие, сокращение расходов на ремонт из-за коррозии и износа бронзы, является актуальной задачей.

Результаты исследований, приведенные в работах [2, 3], свидетельствуют, что детонационное покрытие из Al_2O_3 отличается высоким уровнем прочности сцепления (30...35 МПа) и микротвердости (HV 11500...12500 МПа).

В настоящей работе исследованы антифрикционные свойства и коррозионная стойкость однородных (Al_2O_3 — Al_2O_3) и разнородных пар трения (Al_2O_3 —высокооловянная бронза Бр.ОФ-10-1). Детонационное покрытие наносили на образцы из стали 45, нержавеющей стали 08Х18Н10Т и титанового сплава ЗМ.

Исследование антифрикционных свойств проводили на машине пяточного трения конструкции ЛПИ [4]. Машина предназначена для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа трения различных сочетаний пар материалов на парах образцов, состоящих из колец высотой 8 мм с внешним 52 мм и внутренним 32 мм диаметрами и трех столбиков диаметром 5 мм и высотой 14 мм, помещенных в специальную шайбу. Критериями оценки работоспособности при трении служили износостойкость, коэффициент трения и состояние рабочих поверхностей. Общий путь трения при испытаниях составлял 5 км. Износостойкость оценивали по относительному критерию износа [5].

В однородной паре трения оксид алюминия при удельном давлении 5 МПа обеспечивал работоспособность труящихся поверхностей на протяжении 5 км без повреждения, при этом износ

кольца составил 0,8 мкм, столбиков — 8,9 мкм, коэффициент трения — 0,346...0,585.

В разнородной паре трения в качестве образцов-столбиков использовали бронзу марки Бр.ОФ-10-1. При трении последней в воде при удельном давлении 10 МПа наблюдали перенос («намазывание») на поверхность покрытия из оксида алюминия, что увеличило коэффициент трения (μ) до 0,812. Возрос также износ бронзы, поскольку в этом случае происходило трение одноименных материалов. Сильное «намазывание» бронзы на поверхность покрытия, как правило, сопровождалось появлением усталостного выкрашивания и образованием трещин в покрытии. Износ бронзы достигал 745 мкм. Учитывая низкую работоспособность в воде бронзы Бр.ОФ-10-1 (при трении по покрытию из оксида алюминия) проведены ее дополнительные испытания при трении с добавлением в воду разовой смазки через каждый километр пути трения. Использование морской консистентной смазки марки АМС-1 (рис. 1) резко изменило условия трения — значительно уменьшились «намазывание» бронзы и коэффициент трения. Износ бронзы при этом сократился более чем в 30 раз. Расчетная оценка износа бронзовой втулки и напыленного слоя из Al_2O_3 на баллера показала, что за два года эксплуатации износ подшипниковой опоры баллера из Бр.ОФ-10-1 может достигать 500 мкм, а напыленного слоя — до 25 мкм (при условии применения консистентной смазки в воде). Применение этой пары трения без смазки недопустимо.

Дейдвудные подшипники валопроводов в зависимости от района плавания и типа судна изготавливают из резины, капролона или боксита. В последнее время наиболее распространены подшипники из капролона. Вторым элементом пары трения является бронзовая рубашка, которую насаживают на главный вал с помощью горячей или гидропрессовой посадки.

Обычно удельное давление в подшипнике не превышает 0,3 МПа, а скорость трения — 6 м/с [6]. Исследование работоспособности покрытия Al_2O_3 применительно к условиям работы подшипников валопровода проводили на машине трения

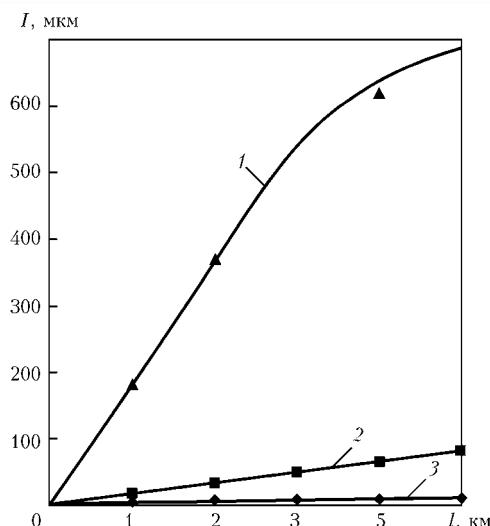


Рис. 1. Зависимость износа I пары трения от пути трения l при скорости трения $v = 0,25$ м/с и удельном давлении $q = 5$ (1), 10 (2), 20 МПа (3); 1 — Al_2O_3 — Al_2O_3 в воде ($\mu = 0,346 \dots 0,486$); 2 — Бр.ОФ-10-1— Al_2O_3 в воде + АМС-1 ($\mu = 0,092 \dots 0,162$); 3 — Бр.ОФ-10-1— Al_2O_3 в воде ($\mu = 0,380 \dots 0,812$)

марки СМЦ-2 при скорости трения 2 м/с и удельном давлении 0,5 МПа.

Испытаниям подвергали образцы, имитирующие систему вал—подшипник. Подшипником служила втулка диаметром 40 мм и шириной 25 мм из капролона, запрессованная в специальную обойму, которую устанавливали на машину для испытаний. Покрытие наносили на наружную поверхность вала и шлифовали. Образцы помещали в герметичную испытательную камеру, заполненную проточной водой. Образцы-валики замеряли на вертикальном компараторе ИЗВ-2 с ценой деления 0,1 мкм, а втулки — прибором внутреннего измерения с ценой деления 0,01 мм. Замеры перед испытанием осуществляли перед и после приработки, а также после каждого 50 км пути трения. Исследуемую пару подвергали приработке при постепенном увеличении удельного давления от 0,1 до 0,5 МПа. Испытаниям подвергали покрытия Al_2O_3 в паре с капролоном. Для получения сравнительных данных испытывали также пару Бр.ОФ-10-1—капролон, широко применяемую в судостроении. Результаты длительных сравнительных испытаний (рис. 2) показали, что износ кап-

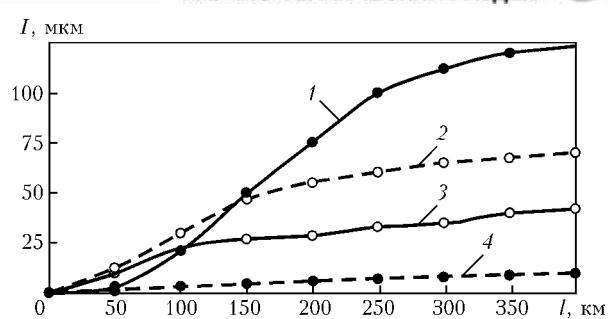


Рис. 2. Зависимость износа пар трения капролон— Al_2O_3 (1, 4) ($\mu = 0,05 \dots 0,16$) и капролон—бронза (2, 3) ($\mu = 0,05 \dots 0,20$) при $v = 2$ м/с и $q = 0,5$ МПа: 1, 3 — износ капролона; 2, 4 — тоже соответственно бронзы и покрытия из Al_2O_3

ролона в обеих парах трения зависит от пути трения. С его увеличением она снижается и стабилизируется. При трении капролона по высокоолювиальному бронзе его износ ниже, чем при трении по покрытию из Al_2O_3 . Однако износ самой бронзы намного выше, чем покрытия. На трущихся поверхностях образцов с покрытием видимых повреждений не наблюдалось, а происходило их постепенная полировка. При трении капролона по бронзе имело место внедрение частиц износа бронзы в капролон, вплоть до образования на его поверхности сплошного слоя из бронзы. Этим, видимо, объясняется повышенный износ бронзовой втулки в паре с капролоном по сравнению с парой капролон—покрытие.

Изменение коэффициентов трения в испытуемых парах приведено на рис. 2. Наибольшие их значения соответствуют началу приработки и моменту запуска машины трения, а наименьшие — моментам установившегося трения и трения в конце каждого испытания.

Для определения коррозионной стойкости покрытия из Al_2O_3 были проведены электрохимические измерения (снятие поляризационных кривых, измерение стационарных потенциалов, потенциалов контактных пар) и испытания на общую, контактную и щелевую коррозию.

Поляризационные кривые получали в динамическом режиме со скоростью 200 мВ/мин в нормальном (0,5 н.) растворе NaCl .

Покрытие из Al_2O_3 как электроизолирующее не принимает участия в электродном процессе,

Результаты коррозионных испытаний различных покрытий из Al_2O_3

Детонационное покрытие	Основа	Время испытания, ч	$\Phi_{стак}, \text{В}$	Характер коррозионных поражений в контакте			
				без контакта	со сплавом ЗМ	с графитом	с углеродистой сталью
Al_2O_3	Сплав ЗМ	3700	+0,07	Видимые поражения отсутствуют	Видимые поражения отсутствуют	Видимые поражения отсутствуют	—
	Сталь 08Х18Н9Т	1500	+0,05	То же	—	То же	—
	Сталь 45	2000	-0,32	Наличие бурых пятен, трещина в покрытии — коррозия основы под покрытием	—	Наличие трещины в покрытии, сильная коррозия основы. Скорость коррозии $0,04 \text{ г}/(\text{м} \cdot \text{ч})$	Налет продуктов коррозии стали 45
Al_2O_3 с пропиткой герметиком «Анатерм-1»	Сталь 45	1500	-0,10	Видимые поражения отсутствуют	—	Видимые поражения отсутствуют	—



но в связи с наличием в нем пор возникает компромиссный потенциал, измеряющий электрохимические характеристики.

Измерение стационарного потенциала $\Phi_{стаци}$ коррозии образцов производили вольтметром ВК7-9 ежедневно в течение 32 сут до установления их стационарных значений (суммарное время испытаний указано в таблице).

На контактную коррозию испытывали образцы с покрытием в сочетании с графитом, сплавом ЗМ и сталью 45 в синтетической морской воде средней солености, которая составляла 35 %. Измерение $\Phi_{стаци}$ контактных пар проводили ежедневно на протяжении 32 сут.

Графит не вызывает коррозии образцов из сплава ЗМ и стали 08Х18Н10Т с покрытием из Al_2O_3 , потенциал короткозамкнутых пар совпадает с потенциалом отдельных образцов. В случае контакта напыленного Al_2O_3 образца из стали 45 с графитом разность потенциалов достигает критического значения — $\Delta\varphi = 0,22$ В. Электролит через поры проникает к основе и вызывает ее усиленную коррозию. При контакте данных образцов со сталью 45 последняя выполняет роль протектора.

Контакт сплава ЗМ с образцами из сплава ЗМ не сказался на их коррозионной стойкости.

Испытания на общую коррозию проводили в лабораторных условиях в синтетической морской воде. Продолжительность испытаний и результаты периодических микроскопических исследований приведены в таблице.

На щелевую коррозию испытывали образцы типа втулка–вал в синтетической морской воде в течение 4000 ч. Втулка была изготовлена из органического стекла, зазор составлял около 0,1 мм.

В связи с отрицательным влиянием пористости на работоспособность покрытия из Al_2O_3 на образце из стали 45 оно было пропитано анаэробным герметиком «Анатерм-1». После поляризации при комнатной температуре герметик закупоривает поры в покрытии, предотвращая тем самым проникновение агрессивной среды в материал основы (таблица).

В образцах из нержавеющей стали 08Х18Н10Т и сплава ЗМ с покрытием склонность к щелевой коррозии не обнаружена, а на примере образцов из стали 45 подтвердился факт общей коррозии основы под слоем покрытия.

Коррозионные испытания показали следующее: детонационное покрытие из Al_2O_3 , нанесенное на сталь 45, из-за наличия пор не защищает ее от коррозии в морской воде; накопление продуктов коррозии основы в порах приводит к разрушению напыленного слоя;

высокую коррозионную стойкость имели образцы из стали 0Х18Н10Т и сплава ЗМ с покрытием из Al_2O_3 ; контакт с графитом не повлиял на кор-

розионную стойкость образцов в синтетической морской воде;

результаты испытаний на общую коррозию образцов из стали 45 с покрытием из Al_2O_3 , пропитанных анаэробным герметиком «Анатерм-1», свидетельствовали об эффективности пропитки; коррозия материала основы из стали 45 отсутствовала.

Выводы

1. Антифрикционные свойства и коррозионная стойкость детонационного покрытия из Al_2O_3 обеспечивают его работоспособность в воде при удельном давлении до 5 МПа и скорости трения 0,25 м/с в однородных парах трения, а в паре с капролоном — при удельном давлении до 0,5 МПа и скорости трения 2 м/с.

2. При нанесении покрытия из Al_2O_3 на углеродистую сталь во избежание коррозии основного металла и последующего разрушения слоя покрытия необходима пропитка слоя анаэробным герметиком или нанесение коррозионностойкого подслоя.

3. Расчет износа пары бронзовая втулка– Al_2O_3 , выполненный по результатам лабораторных антифрикционных испытаний, показал, что износ бронзы за два года эксплуатации не должен превышать 500 мкм, а напыленного покрытия из Al_2O_3 — 25 мкм при условии применения консистентной смазки типа АМС-1 в воде, что в 2–3 раза лучше, чем при использовании пары бронзовая втулка–капролон.

4. Результаты длительных испытаний подшипников валопровода с покрытием из Al_2O_3 в паре с капролоном показали их хорошую работоспособность, а также возможность замены бронзовой облицовки на углеродистую сталь с покрытием из оксида Al_2O_3 .

Автор выражает признательность канд. техн. наук В. Н. Гольдфайну, сотруднику ЦНИИ «Прометей» (РФ), за помощь в выполнении настоящей работы.

1. Виноградов С. С. Скоростной ремонт промысловых судов. — Л.: Судостроение, 1967. — 215 с.
2. Зверев А. И., Шариков С. Ю., Астахов Е. А. Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — 232 с.
3. О формировании детонационно-газовых покрытий из оксида алюминия / Ю. А. Харламов, М. И. Анисимов, В. Н. Гольдфайн и др. // Жаростойкие неорганические покрытия. — Л.: Наука, 1990. — С. 125–128.
4. Исследование антифрикционных свойств покрытий из ВК15, нанесенного детонационным методом на сплав ВТ5 / В. Н. Гольдфайн, Е. А. Астахов, А. И. Зверев, В. Л. Лукина // Порошковая металлургия. — 1979. — № 1. — С. 81–84.
5. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. — Л.: Машиностроение, 1977. — 194 с.
6. Виноградов С. С., Гавриш П. И. Износ и надежность винторулевого комплекса судов. — М.: Транспорт, 1980. — 140 с.

The paper presents the results of antifriction and corrosion testing of a detonation coating of Al_2O_3 in a similar combination and in a pair with high-tin bronze in water, including addition of lubrication, as well as after long-term comparative testing in a pair with caprolan. A satisfactory performance of samples simulating the operation of bearings of the support assembly of a rudder spindle is established.

Поступила в редакцию 08.04.2004,
в окончательном варианте 04.06.2004



УДК 621.791.72

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИЙ*

Академик **Б. Е. ПАТОН, А. А. БОНДАРЕВ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен ряд оригинальных технологических разработок, выполненных специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона за период с 1969 по 2003 гг. На примере конкретных конструкционных материалов показаны преимущества процесса сварки электронным пучком. Даны рекомендации по проектированию технологического процесса сварки в условиях промышленного предприятия. Приведены примеры новых технологических разработок, включая сварку высокопрочных алюминиевых сплавов, легированных литием, скандием, сварку разнородных и композиционных материалов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, программирование, тепловложение, сварные конструкции, разнородные материалы, композиционные материалы, диспергирование, технология производства, дискретное сканирование

Процесс электронно-лучевой сварки (ЭЛС) относится к категории высоких технологий и в основном применяется при изготовлении конструкций, к которым предъявляются высокие требования по качеству, прочности и надежности сварных соединений. За прошедшие более чем 45 лет с момента первого промышленного внедрения он широко применяется в ракетно-космической технике, энергетике, авиа-, судо-, приборостроении и др. [1, 2].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) разработаны и внедрены в промышленное производство технологии изготовления крупнокорпусных конструкций и топливных баков баллистических ракет [3–6], ракет морского базирования [7–10] и крылатых ракет [11, 12]. Электронным пучком свариваются крыльевые устройства судов на подводных крыльях. Как окончательная сборочно-сварочная операция этот способ используется при производстве гироскопов пусковых платформ, современных танков, судовых навигационных систем [13–15]. С использованием ЭЛС изготавливаются толстостенные оболочечные конструкции ядерных комплексов и тонкостенные элементы устройств СВЧ техники. ЭЛС алюминиевых сплавов находит широкое применение в производстве конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по прочности, плотности соединений, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, глубокого вакуума и криогенных температур. Примеры таких конструкций представлены на рис. 1–4. Экономически целесообразно применение процесса ЭЛС изделий в условиях их массового изготовления, например, при сварке поршней с полостью масляного охлаждения фор-

сированных дизелей (рис. 5). Примером применения ЭЛС как финишной операции является сварка корпусов и «поплавков» гироскопов (рис. 6). При этом обеспечиваются высокое качество и точность изготовления изделий, которых невозможно достичь при использовании других способов сварки. Особенно эффективен этот способ при изготовлении крупногабаритных конструкций, имеющих однотипные сварные соединения. При этом

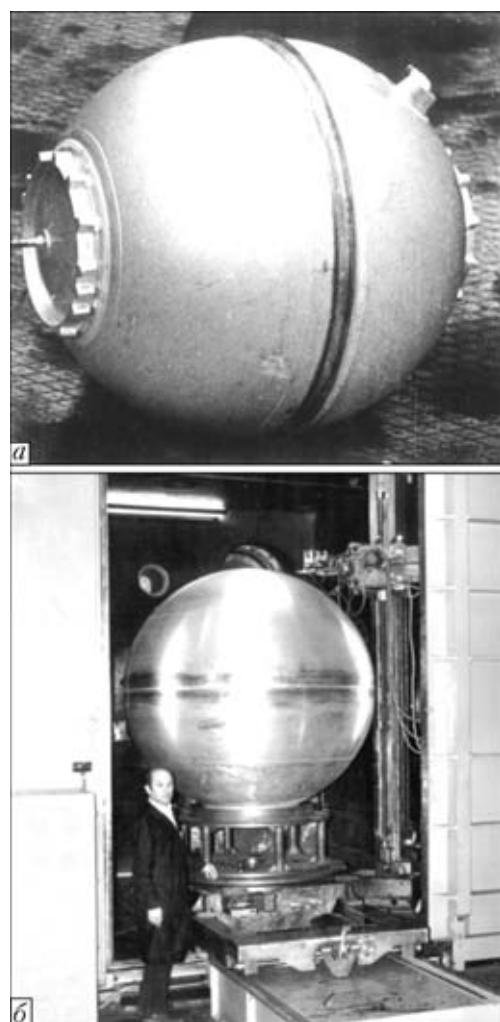


Рис. 1. ЭЛС шаровых емкостей из алюминиевых сплавов диаметром 600 (а) и 2000 (б) мм

*Материалы настоящей статьи в сокращенном варианте должны на 6-й Международной конференции «Лучевые технологии», состоявшейся 20–28 апреля 2004 г. в г. Галле, Германия (см. сборник докладов «Strahltechnik», Vortrage der 6 Konferenz «Strahltechnik» in Halle vom 20 bis 28 April 2004. — DVS SLV, GDL. — S. 75–79).

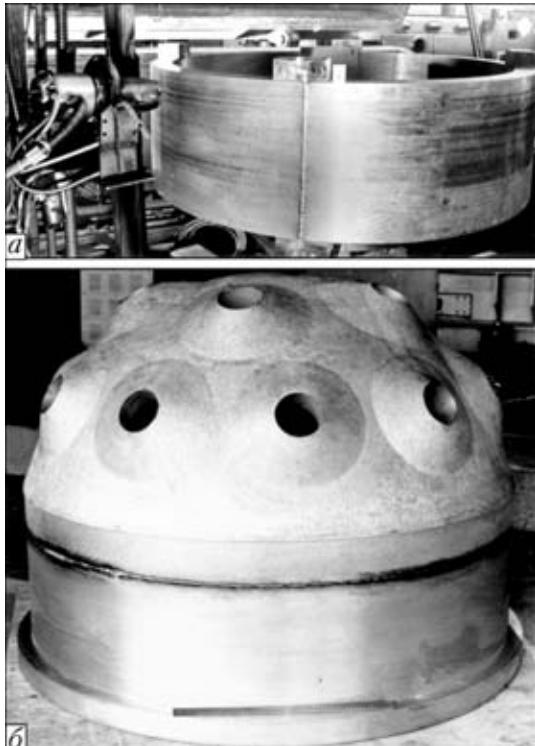


Рис. 2. ЭЛС обечайки (а) и полусферы (б) из сплава 1201 с толщиной свариваемых кромок 90 и 100 мм

реализован способ сварки с локальным вакуумированием стыка. По такой технологии изготавливали обечайки большого диаметра, имеющие несколько продольныхстыковых соединений [16, 17], а также толстолистовые полотнища заготовок днищ железнодорожных цистерн из чистого алюминия [18]. Для изготовления оболочек из тонколистовых ребристых панелей разработана технология их сварки с предварительным упругим растяжением свариваемых элементов (рис. 7). Этот перечень можно продолжить, но главным остается принцип учета тех критериев и оценок, по которым следует



Рис. 3. Внешний вид фрагмента крупногабаритной обечайки из сплава АМг6 диаметром 1145 мм и толщиной свариваемых кромок 90 мм

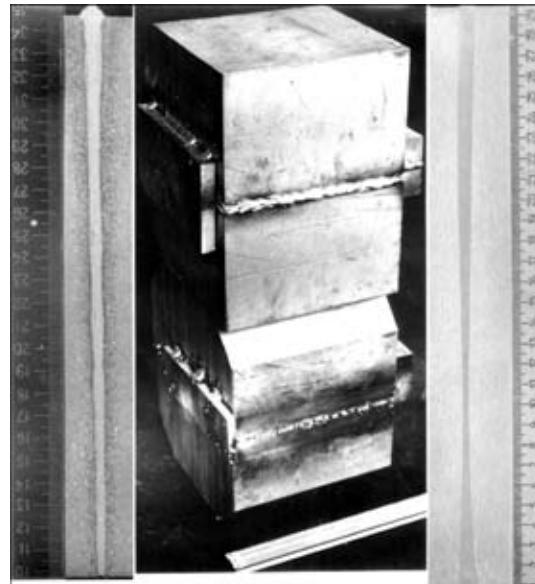


Рис. 4. Внешний вид макетов стыкового соединения большой толщины со стороны шва, а также макрошлифы поперечных сечений соединения сплава 1201 толщиной 250 мм (слева) и сплава АМг6 толщиной 300 мм (справа). Сварка выполнена за один проход горизонтальным пучком на подъем

сделать выбор в пользу применения ЭЛС. Сегодня инженеры-технологи и конструкторы, к сожалению, не всегда в полном объеме владеют информацией, характеризующей возможности этого процесса сварки. Накопленный в ИЭС им. Е. О. Патона опыт в этой области позволяет обобщить и сформулировать его основные отличительные черты и преимущества:

повышение прочностных характеристик соединений на 15...25 % по сравнению с процессами дуговой сварки;

малая ширина металла ЗТВ и, как следствие, снижение весовых характеристик изделий;

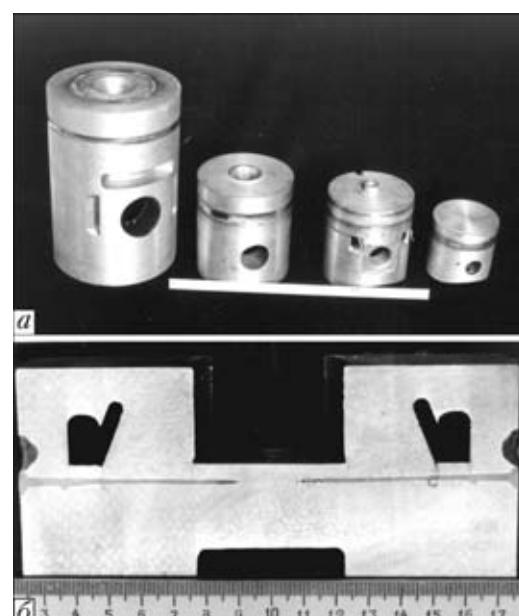


Рис. 5. Типоразмерный ряд сварных поршней (а) и макрошлиф головки поршня с полостью масляного охлаждения и упрочняющей наплавкой зоны верхней компрессионной канавки, выполненных ЭЛС (б), [19]

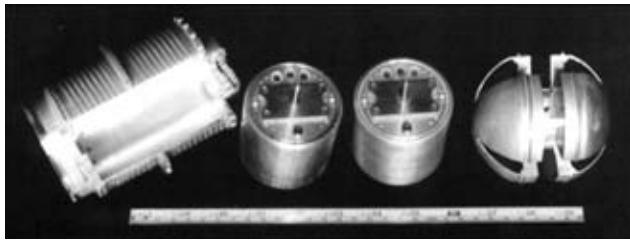


Рис. 6. Корпуса электровакуумных приборов из алюминиевых сплавов, изготовленные с применением ЭЛС, [20]

высокая стабильность геометрических форм и размеров конструкций, особенно когда ЭЛС является финишной операцией изготовления изделий;

высокое качество сварных соединений;

отсутствие оксидных включений и включений вольфрама; удаление вредных примесей с парами металла; мелкокристаллическая структура металла шва и сохранение его структуры в металле ЗТВ и т. д.;

возможность сварки конструкций при отсутствии доступа к обратной стороне стыка; на весу малых толщин; в различных пространственных положениях, в том числе с одновременной подачей в сварочную ванну присадочной проволоки;

низкий уровень общего разогрева конструкций и возможность одновременного вакуумирования внутреннего объема, особенно при герметизации приборов;

независимость качества сварных соединений от человеческого фактора, высокая чистота, вакуумная гигиена и экологичность процесса;

высокая производительность процесса сварки при скоростях до 120 м/ч и выше, возможность реализации групповой технологии при одновременной загрузке в камеру партии изделий;

полная автоматизация всех операций по управлению источником питания, вакуумными агрегатами, манипуляторами, аппаратурой управления пучком и диагностикой качества;

экономичность по сравнению с аргонодуговой (АДС) или плазменной сваркой (нет необходимости в применении защитных газов, вольфрамовых электродов, подготовке разделки кромок при сварке больших толщин);

возможность выполнения некоторых типов соединений, которые невозможно выполнить другими способами сварки.

Для освоения процесса ЭЛС в условиях промышленного производства необходимо осуществить целый ряд мероприятий, основной перечень которых представлен на рис. 8. При этом основное внимание должно быть уделено оснащению установки ЭЛС и энергокомплекса современными средствами управления на основе компьютерной техники с соответствующим программным обеспечением. Только при таком решении влияние человеческого фактора и внешних условий на качество изделий будет минимальным [21].

Сегодня появляются новые конструкционные материалы с уникальными характеристиками. К ним в первую очередь можно отнести уже широко используемые в авиационной, аэрокосмической и оборонной технике алюминиево-литиевые сплавы,

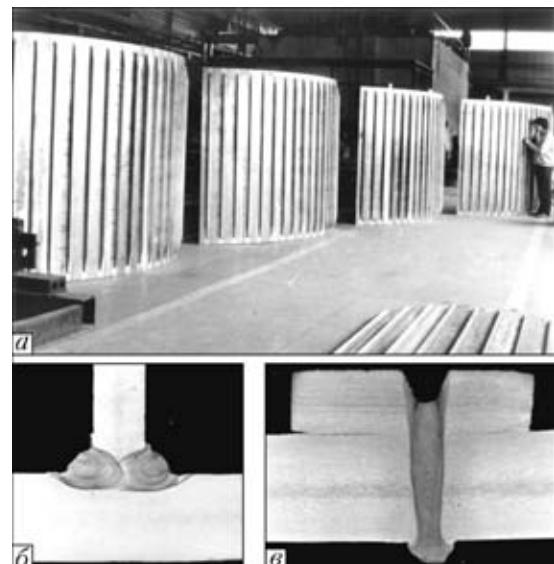


Рис. 7. Внешний вид опытной партии стрингерных панелей из сплава АМг6Н, выполненных с предварительным упругим расстоянием (а); макрошлифы соответственно двухстороннего таврового соединения приварки ребра (б) и стыкового соединения полотнища при укрупнении панелей (в)

композиционные материалы с алюминиевой матрицей, пеноалюминий, материалы сnanoструктурой и др. Одновременно продолжают совершенствоваться и технологии, а также оборудование и аппаратура управления установок для ЭЛС. Это обусловлено тем, что, как и при использовании уже известных технологий, при сварке новых конструкционных материалов необходимо обеспечить максимально возможные прочностные и эксплуатационные характеристики соединений и конструкций в целом. С этой целью в ИЭС им. Е. О. Патона разработан принципиально новый технологический процесс ЭЛС, который отличается возможностью контролируемого тепломассопереноса в условиях сформировавшегося объема жидкого металла сварочной ванны. При любом из известных способов сварки плавлением управление потоками жидкого расплава в сварочной ванне дает возможность эффективно повышать качество и плотность формируемых соединений. При ЭЛС алюминиевых сплавов, у которых на поверхности находится оксидная плена, насыщенная влагой, а в основном металле, кроме растворенного водорода, присутствуют легирующие элементы такие, как цинк, магний, литий, имеющие в условиях вакуумной камеры высокую упругость пара, управление микрокапиллярными процессами и температурным состоянием в пределах сварочной ванны приобретает особое значение.

Основой разработанной технологии является прибор управления электронным пучком — программатор, позволяющий осуществлять дискретное сканирование пучка электронов по любой заданной траектории с периодическими его остановками на ней и с управляемым временем задержки в точках дискрета по заранее разработанной программе. Управление процессом осуществляется с использованием современной компьютерной техники, а сам программатор приспособлен для работы с любым источником питания и независимо от фирмы-про-



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

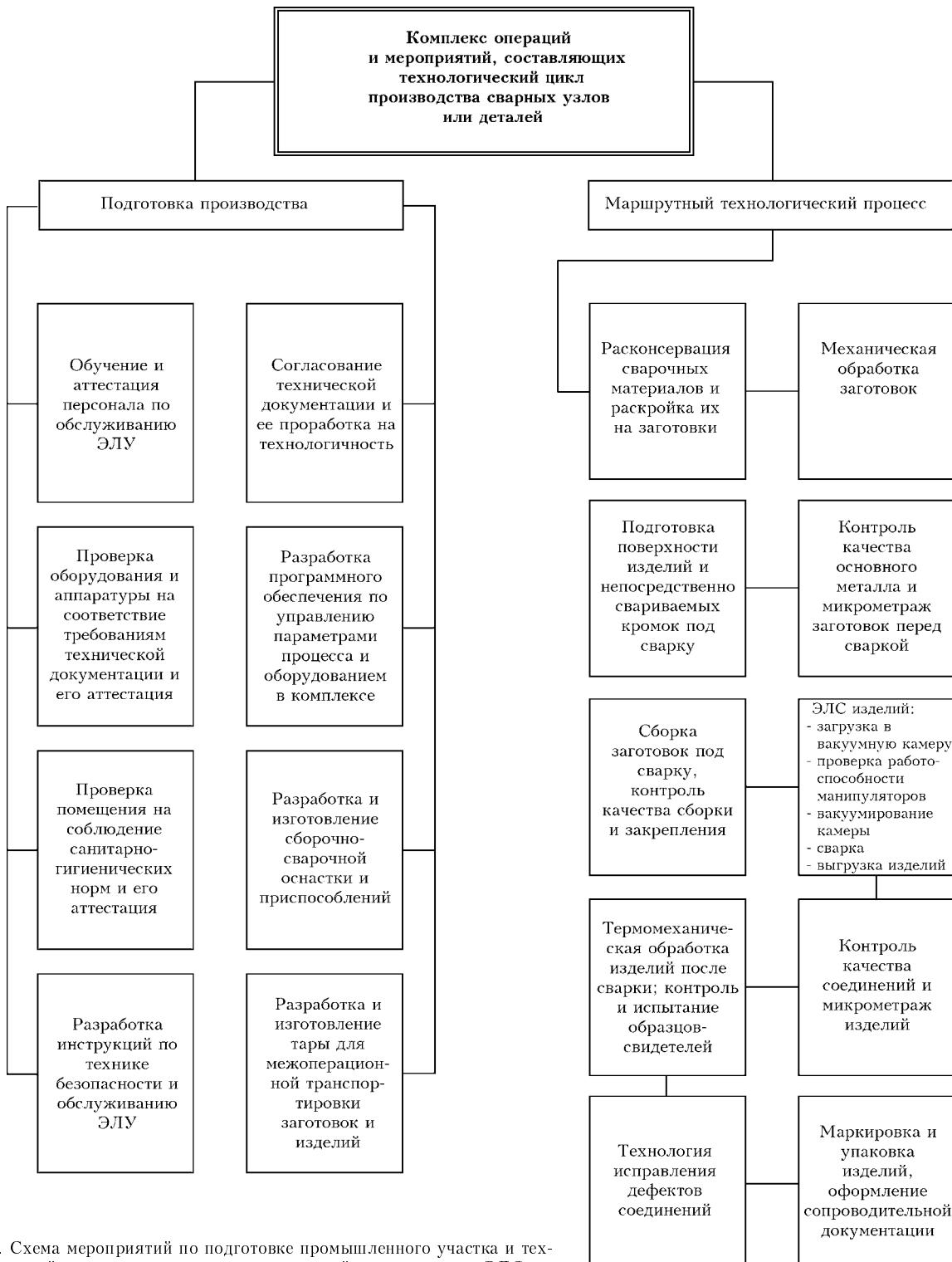


Рис. 8. Схема мероприятий по подготовке промышленного участка и технологический процесс изготовления конструкций с применением ЭЛС

изводителя энергокомплекса. С использованием разработанной аппаратуры и программного обеспечения появилась возможность на более высоком уровне решать многие конструкторские и технологические проблемы [22]. Управление распределением плотностью мощности пучка в пятне нагрева позволяет, например:

управлять тонкой структурой металла шва и на этой основе повышать механические свойства соединений;

избегать анизотропии прочностных характеристик в соединении при сварке стыков с большой толщиной свариваемых кромок;

получать соединения с равной шириной шва по толщине кромок и за счет этого уменьшать остаточные угловые деформации;

выполнять сварку соединений с большим зазором в стыке без проникновения пучка электронов в зазор;

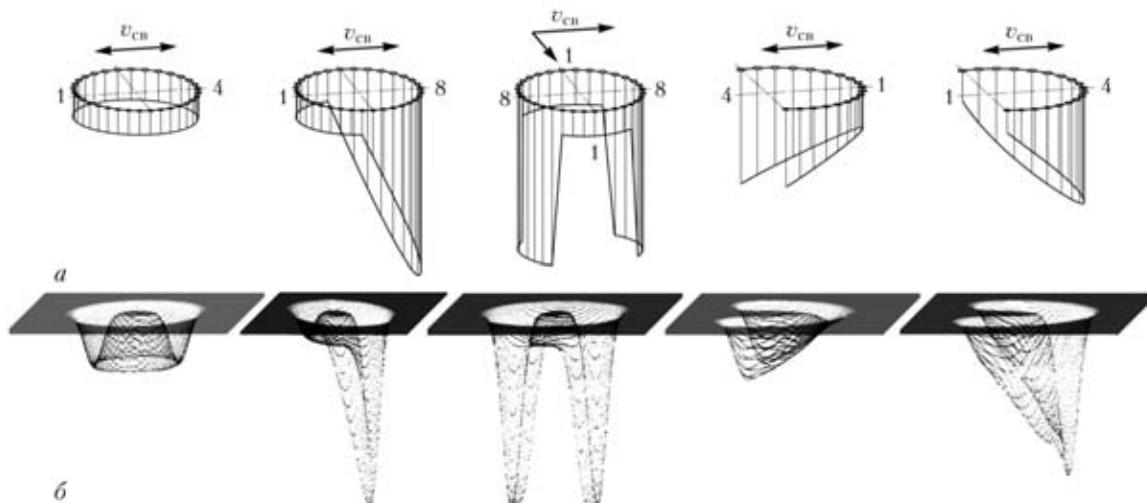


Рис. 9. Технологические схемы дискретного сканирования электронного пучка (а) и диаграммы пространственного распределения плотности мощности (б) (цифры — относительное время задержки пучка в точках дискрета на контуре сканирования)

выполнять сварку разнородных или разноименных материалов, имеющих разные теплофизические характеристики, за счет обеспечения разного тепловложения по кромкам стыка;

получать соединения при разнотолщинности кромок в соотношении 1:50 и более;

выполнять сварку стыков с одновременной подачей присадочной проволоки с любой стороны сварочной ванны относительно направления перемещения пучка;

выполнять сварку соединений с неполным проваром без образования корневых дефектов, а также при сварке кольцевых швов избежать образования дефектов на участке вывода кратера и перекрытия шва;

выполнять модифицирование поверхностных слоев деталей с легированием поверхностного слоя без перемешивания с матричным материалом.

Технологические схемы дискретного сканирования пучка и диаграммы пространственного распределения плотности мощности, представленные на рис. 9, построены с использованием компьютера и разработанного программного обеспечения [23–26]. Составление программы для выполнения сварки конкретного соединения (с обеспечением предъявляемых требований к качеству формирования и плотности швов) оператор-сварщик выполняет в соответствии с разработанным алгоритмом, самостоятельно устанавливает все необходимые параметры дискретного сканирования (вид траектории, количество точек на ней, очередность перемещения пучка из точки в точку, амплитуду развертки, время задержки пучка в каждой из точек дискрета и т. д.) и на мониторе в режиме визуального проектирования контролирует результат реализации выбранной программы (рис. 10). После установления основных параметров процесса сварки спроектированная программа запускается оператором на автоматическое ее выполнение в режиме реальной сварки изделий без участия оператора. Способ сварки электронным пучком с программированием распределения плотности мощности в пятне нагрева дает возможность при неизменных значениях параметров мощности пучка и

погонной энергии получать соединение такой формы и структуры, которые невозможно воспроизвести при других способах сварки плавлением.

На рис. 11 показаны примеры асимметричного проплавления шва сплава АМг6 при круговой развертке пучка диаметром 5 мм и переплав порошкообразной присадки на поверхности лопатки из сплава ЧС70 при ширине одновременно обрабатываемой зоны в поперечном сечении до 40 мм и подплавлением матричного основного материала лопатки на глубину не более 150 мкм. Вариант управления структурообразованием металла шва в зависимости от частоты сканирования и положения фокального пятна пучка относительно поверхности приведен на рис. 12.

Рассмотрим конкретные примеры реализации новых технологических решений при изготовлении или сварке конструкций с использованием новых материалов, которые трудно поддаются сварке или считались несвариваемыми. Нами разработана технология сварки новых высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов с гарантированным обес-

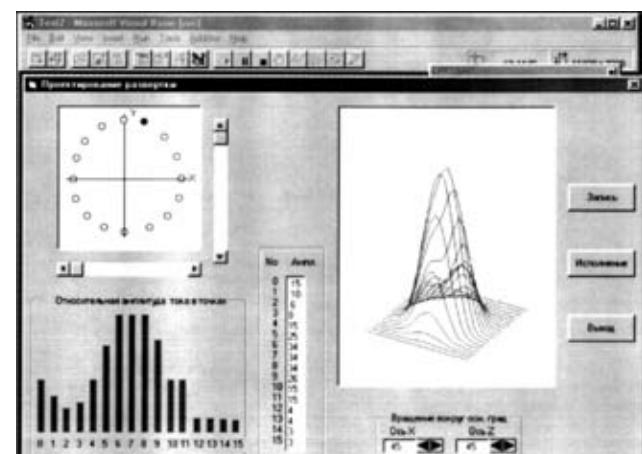


Рис. 10. Внешний вид экрана монитора с элементами набора программы управления дискретным сканированием пучка в соответствии с разработанным алгоритмом и визуализация объемного распределения плотности мощности в пятне нагрева в соответствии с заданными оператором параметрами процесса сканирования

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

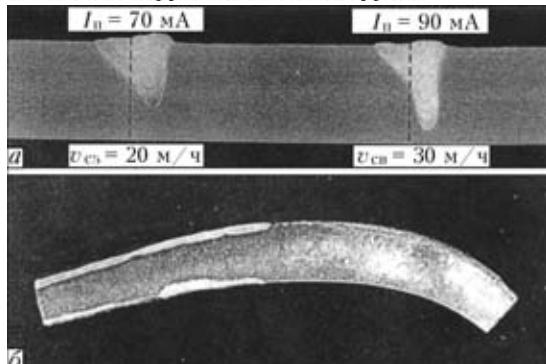


Рис. 11. Поперечные макрошлифы асимметричного проплавления сплава АМг6 (а) и модифицированной поверхности турбинной лопатки из сплава ЧС70 (б) [27, 28]

печением высоких механических свойств сварных соединений (таблица) и плотности металла шва.

Алюминиево-литиевые сплавы имеют более высокие прочностные характеристики по сравнению с широко используемыми сплавами АМг6 и 1201, способствуют снижению массы сварных конструкций на 15...20 % за счет более низкого удельного веса.

Принципиально по-новому решена проблема сварки для криогенной техники трубчатых переходников из разнородных материалов — нержавеющей стали с алюминиевыми сплавами. Сегодня для изготовления таких переходников часто используют способы сварки без расплавления кромок, а именно: сварку взрывом, металлургический прокат биметалла или диффузионную сварку. Все перечисленные способы имеют одно общее условие — обязательный контакт чистого алюминия со сталью. В этом виде соединение будет иметь прочностные свойства на уровне чистого алюминия, а из-за наличия в зоне перехода интерметаллидной прослойки его работоспособность в условиях теплосмен будет ограничена.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ сварки материалов, при котором исключен прямой контакт алюминия со сталью. С этой целью вначале на поверхность свариваемой нержавеющей трубы из паровой фазы в вакууме наносится тонкий слой 3...7 мкм элементов-модификаторов, таких, как никель, цирконий, ниобий и т. д. (рис. 13).

Определенный температурный режим обеспечивает надежное адгезионное сцепление напыленного слоя с материалом стали. Затем при сборке нержавеющей трубы с трубой из любого алюминиевого сплава осуществляется сваркастыка таким образом, чтобы проплавить алюминиевую трубу на всю толщину, а кромка со стороны стали чтобы была лишь подогрета и смочена жидким алюминием.

Реализация этого способа стала возможной лишь при использовании принципа программирования тепловложения в необходимом объеме на каждую из заготовок. Элементы-модификаторы на поверхности стальной трубы обеспечивают дополнительное легирование жидкого расплава алюминиевой ванны и соединение приобретает совершенно новые свойства. При испытании на разрыв временное сопротивление составило 320...350 МПа, что в 4...5 раз выше, чем при испытании соединений, имеющих

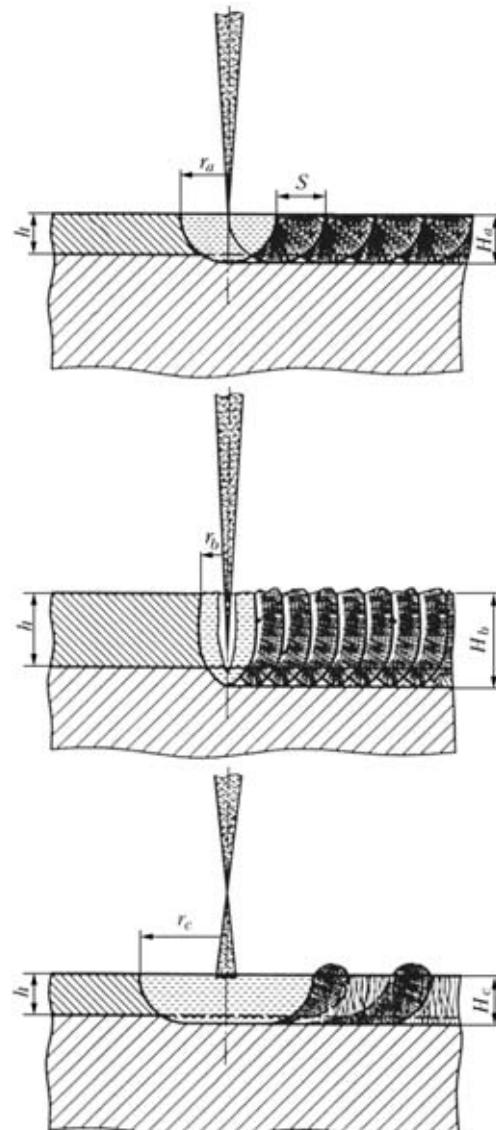


Рис. 12. Схематическое изображение формирования структуры поверхностного слоя при оплавлении предварительно панесенной присадки в зависимости от изменения параметров дискретно сканирующего пучка [29]

прослойку интерметаллидов и чистого алюминия (рис. 14).

Разработана также технология ЭЛС композиционных материалов с алюминиевой матрицей и упрочненных частицами SiC или Al_2O_3 без расплавления кромок. Сварка таких соединений осу-

Прочностные свойства алюминиево-литиевых сплавов и их сварных соединений

Марка сплава	Система легирования	Механические свойства основного металла			Временное сопротивление разрыву соединений, МПа	
		σ_u , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	АДС	ЭЛС
1420	Al-Mg-Li	470	292	11,8	352	402
1421	Al-Mg-Li-Sc	490	358	9,8	385	407
1430	Al-Mg-Li-Cu	460	350	10,0	330	355
1440	Al-Mg-Li-Cu	505	440	5,0	295	317
1460	Al-Cu-Li	580	425	11,0	290	305



Рис. 13. Технологическая схема нанесения на поверхность нержавеющей трубы барьерного покрытия элементов-модификаторов из паровой фазы в вакууме перед ее сваркой с трубой из алюминиевого сплава

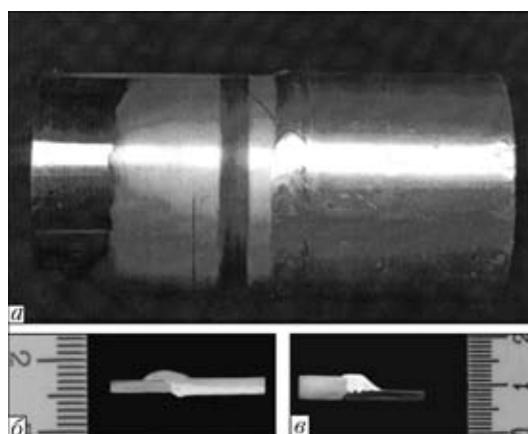


Рис. 14. Внешний вид трубчатого переходника нержавеющая сталь – алюминиевый сплав (а); макрошлифы соединений, выполненных ЭЛС с предварительным осаждением на кромку нержавеющей трубы элементов-модификаторов из паровой фазы (б), [30]

ществляется нанесением на соединяемые кромки диспергированного потока мелких капель присадочного материала. В качестве присадочного материала может быть использован как матричный материал композита, так и другой алюминиевый сплав. Расходуемый электрод присадочного материала при этом оплавляется электронным лучом и за счет его вращения с высокой скоростью мельчайшие капельки, попадая на кромки, формируют соединение без наличия каких-либо дефектов или границ раздела (рис. 15). Этот же процесс можно использовать и для получения металлических порошков сверхчистого состава без окисления поверхностного слоя, а также для получения сверхтонких чешуйек. Для этого на пути диспергированного потока устанавливается охлаждаемая мишень, на которой и происходит сплющивание и кристаллизация капелек. Такие чешуйки имеют нанокристаллическое строение и могут быть использованы в производстве для прессования деталей с особыми свойствами и структурой.

В последние годы внедрена комбинированная технология изготовления анодных спусков для

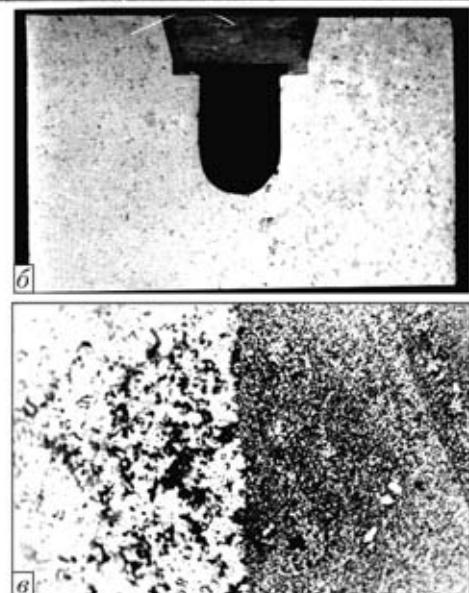
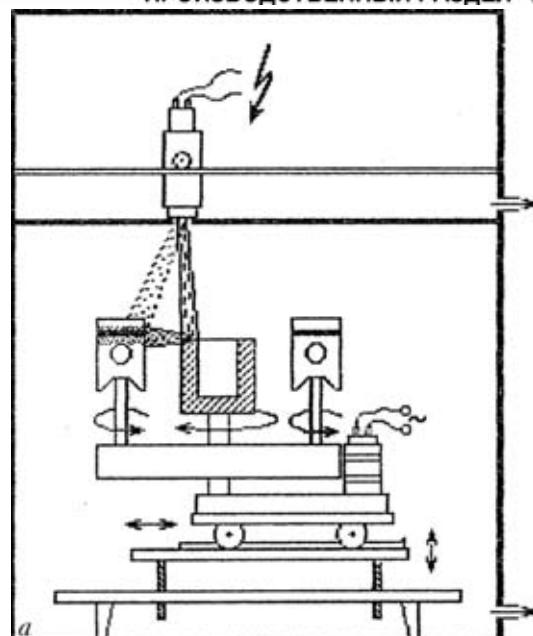


Рис. 15. Технологическая схема соединения путем нанесения способом диспергирования в вакууме расходуемого электрода электронным пучком (а); макрошлиф герметизации полости масляного охлаждения в головке поршиня, изготовленного из композитного материала алюминиевый сплав + 18 % SiC (б); микроструктура границы перехода композит–диспергированная присадка (в), [31]

электролизеров по производству алюминия и аппаратных зажимов для энергетиков. В первом случае взрывной технологией изготавливаются плоские переходники алюминий–нержавеющая сталь, во втором по этой же технологии осуществляется одно- или двухсторонняя плакировка чистого алюминия медью. Затем электронным лучом первые переходники сваривают алюминиевый слой с алюминиевой ошиновкой, а нержавеющий слой сваривают со стальным кронштейном. Соединение стали с алюминием при этом не подвергается значительному разогреву и не происходит роста интерметаллидной прослойки на границе раздела. Конструкция выдерживает очень большие статические нагрузки (рис. 16). Те же преимущества

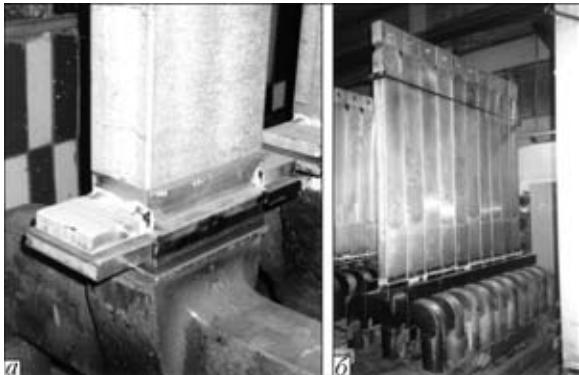


Рис. 16. Внешний вид подготовленного к ЭЛС стыка анододержателя с использованием переходника алюминий–нержавеющая сталь, полученного по взрывной технологии, (а), и партия готовых анододержателей, подготовленных к отправке на металлургический комбинат, (б)

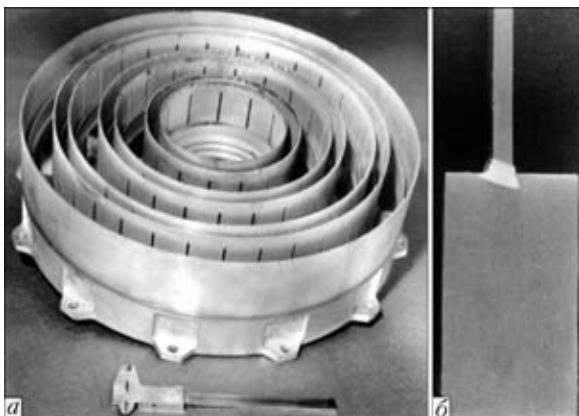


Рис. 17. Фрагмент системы СВЧ излучения, изготовленный из алюминиевого сплава и сваренный электронным лучом, (а); макрошлиф поперечного сечения приварки односторонним швом тонкостенной обечайки к фланцу большой толщины (б)

достигаются и при изготовлении концевых зажимов. Электрическое сопротивление после сварки электронным лучом не возрастает.

Сварка с программированием тепловложения успешно реализована при изготовлении элементов, генерирующих СВЧ излучение. В этой конструкции тонкостенные обечайки диаметром 150...500 мм и толщиной стенки 0,8 мм приварены к фланцу толщиной 20 мм и более. При этом формировалось одностороннее тавровое соединение с высокой плотностью металла шва, а деформация тонкостенных обечеек не превышала 0,03 мм на диаметр (рис. 17).

При ЭЛС конструкций с большой толщиной кромок или при их переменном сечении успешно реализована технология с микролегированием металла шва по всей глубине ванны элементами-модификаторами, такими, как скандий, цирконий и др. С этой целью до сварки в соединение укладывали присадку в виде тонкой фольги толщиной 100...200 мкм, полученной в условиях сверхбыстрой кристаллизации в вакууме (до 10^7 К/с) и имеющей в своем составе элементы-модификаторы в объеме, намного превышающем их взаимную растворимость в алюминии. Так, например, содержание скандия составляло 2...4, циркония 1,4...1,5 об. %. Это позволяет повысить плотность и, что более важно, увеличить прочностные характеристики соедине-



Рис. 18. Внешний вид сваропаяных рабочих колес центробежного компрессора из высокопрочной нержавеющей стали (а); макрошлиф сваропаянского соединения, полученного ЭЛС и пайкой в вакууме (б), [32, 33]

ний любых марок алюминиевых сплавов, повышает стойкость к образованию горячих трещин.

При промышленном изготовлении рабочих колес центробежных компрессоров газораспределительных станций из высокопрочных нержавеющих сталей ЭЛС прорезными швами приваривали покрывающий диск к цельнофрезерованным лопаткам основного диска. Затем участки с непроварами заполняли высокотемпературным припоеем с наполнителем и подвергали колесо пайке в вакууме. Полученные по такой технологии соединения равнопрочны с основным металлом при испытании образцов на усталость и длительную прочность. Колеса диаметром 450...800 мм, изготовленные по комбинированной технологии, показаны на рис. 18.

В заключение можно отметить, что приведенные выше технологии относятся к разряду научноемких, которые постоянно развиваются и совершенствуются. Специалисты института готовы сотрудничать в этом направлении с представителями промышленных и научных организаций любого профиля, независимо от форм собственности.

1. Электроннолучевая сварка и последующая термомеханическая обработка обечаек большого диаметра из сплава 1201 // Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, А. А. Бондарев и др. // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 1–5.
2. Bondarev A. A. Electron beam welding of high-strength aluminum alloys // Paton Welding J., Pilot Issue. — 1999. — July. — P. 50–53.
3. Особенности электроннолучевой сварки сплава 1201 // А. А. Бондарев, А. В. Лозовская, А. Я. Ищенко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 44–47.
4. Бондарев А. А., Третяк Н. Г. Свойства соединений листов и плит алюминиевого сплава 1201, сваренных электронным лучом // Там же. — 1980. — № 7. — С. 49–51.
5. Бондарев А. А., Третяк Н. Г. Особенности сварки электронным лучом поковок сплава 1201 толщиной до 250 мм и



- механические свойства соединений // Там же. — 1981. — № 4. — С. 1–5.
6. Бондарев А. А. Сопротивление усталости алюминиевых сплавов АМг6, АМг6Н, 1201 и их соединений, выполненных электроннолучевой сваркой // Там же. — 1981. — № 6. — С. 40–42.
7. Исследование механических свойств, структуры и деформаций соединений сплава 01420, выполненных электроннолучевой сваркой / А. А. Бондарев, Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак и др. // Там же. — 1975. — № 3. — С. 14–17.
8. Бондарев А. А., Рабкин Д. М., Кузьменко О. С. Свариваемость сплава АМг6 электронным лучом в различных пространственных положениях // Там же. — 1976. — № 12. — С. 34–37.
9. Бондарев А. А., Скрябинский В. В. Влияние параметров развертки электронного пучка на характеристики сварных соединений алюминиевых сплавов // Там же. — 1987. — № 12. — С. 57–62.
10. Бондарев А. А., Баранов В. В. Автоматизация расшифровки рентгенограмм сварных швов // Там же. — 1988. — № 6. — С. 73–74.
11. Влияние способов сварки плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов на механические свойства и структуру сварных соединений / А. А. Бондарев, А. В. Лозовская, Андр. А. Бондарев и др. // Сб. тр. VII Междунар. конф. «Проблемы металлургии, металловедения и сварки». — Тбилиси: ИМЕТ, 2002. — С. 381–388.
12. Электроннолучевая сварка плит большой толщины из сплава АМг6 / Е. Г. Терновой, А. А. Бондарев, С. В. Пещерина и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 6. — С. 49–52.
13. Бондарев А. А., Кулакова А. Ф., Михайличенко М. Д. Прогрессивные методы обработки деталей приборов // Автоматика и приборостроение. — 1965. — № 2. — С. 63–66.
14. Бондарев А. А., Воропай Н. М., Иванов Н. П. Разработка технологии электронно-лучевой сварки корпусов изделий из сплава АМг6 // Свароч. пр-во. — 1972. — № 3. — С. 18–20.
15. Бондарев А. А., Шевелев А. Д., Задерий Б. А. Развитие технологии электроннолучевой сварки цветных и тугоплавких металлов и сплавов // Автомат. сварка. — 1991. — № 6. — С. 46–48.
16. Электроннолучевая сварка обечайек в локальном вакууме / А. А. Бондарев, А. И. Некрасов, М. И. Морейнис и др. // Там же. — 1984. — № 2. — С. 75.
17. Электроннолучевая сварка крупногабаритных узлов из алюминиевых сплавов в камерах местного вакуумирования / Г. Л. Зубриенко, Ф. З. Тэненбаум, В. М. Петрованов и др. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. Докл. I Всесоюз. конф. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 476.
18. Бондарев А. А., Третяк Н. Г., Зареченский А. В. Электроннолучевая сварка алюминия АДО применительно к изготовлению котлов железнодорожных цистерн // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по сварке цветных металлов. — ТПИ, Тольятти, 1986. — С. 22.
19. Бондарев А. А., Терновой Е. Г., Шалаев А. Н. Совершенствование конструкционных сварнолитых поршней дизелей, свариваемых способом ЭЛС // Автомат. сварка. — 1988. — № 8. — С. 74–75.
20. Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов / Б. Е.
- Патон, Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, А. А. Бондарев // Там же. — 1989. — № 10. — С. 37–45.
21. Компьютерное управление процессом электроннолучевой сварки с многоординатными перемещениями пушки и изделия / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестренко и др. // Там же. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
22. Bondarev A. A., Bondarev Andr. A., Lankin Yu. N. Electron beam welding with a controllable heat and mass transfer // Current problems in welding and life of structures. — Intern. conf. — Kiev, 2003. — P. 188.
23. Ланкин Ю. Н., Бондарев А. А., Байштрук Е. Н. Управление распределением плотности мощности электронного пучка по его сечению // Автомат. сварка. — 1985. — № 6. — С. 12–15.
24. Бондарев А. А., Скрябинский В. В. Влияние параметров развертки электронного пучка на характеристики сварных соединений алюминиевых сплавов // Там же. — 1987. — № 12. — С. 57–62.
25. Бондарев А. А., Скрябинский В. В. Сварка алюминиевых сплавов с программированием распределения плотности мощности электронного пучка по пятну нагрева // Автоматическое управление технологическим процессом электроннолучевой сварки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, 1987. — С. 62–58.
26. Бондарев А. А., Бондарев Андр. А., Ланкин Ю. Н. Электроннолучевая сварка с управляемым тепломассопереносом // Современные проблемы сварки и ресурса конструкций: Тез. докл. — Киев, 24–27 нояб. 2003.
27. Ланкин Ю. Н., Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. Компьютерное управление процессами в сварочной ванне при электроннолучевой сварке // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», Феодосия. — Киев: АТМ Украина, 2001. — С. 314.
28. Создание защитно-восстанавливающих покрытий на жаропрочных высоконикелевых сплавах / М. Л. Жадкевич, А. А. Бондарев, В. И. Зеленин и др. // Там же. — С. 76–78.
29. Пат. Украины № 46073. Способ формования покрытия на поверхности виробів / Д. А. Дудко, А. А. Бондарев, В. И. Зеленин та ін. — Опубл. 15.05.2002, Бюл. № 5.
30. Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. Электроннолучевая сварка трубчатых переходников из разнородных материалов нержавеющей стали–алюминиевый сплав // Современные проблемы сварки и ресурса конструкций: Тез. докл. — Киев, 24–27 нояб. 2003. — С. 12.
31. Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. Некоторые закономерности центробежного распыления в вакууме и математическая модель процесса при электроннолучевом оплавлении быстровращающейся заготовки // Проблемы сварки, металлургии и смежных технологий. — Тбилиси: ИМЕТ, 1996. — С. 18–29.
32. Технология производства сваропаяемых высоконагруженных рабочих колес центробежных компрессоров / К. А. Ющенко, А. А. Бондарев, Т. М. Старущенко и др. // Сварные конструкции: Тез. докл. Междунар. конф. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — С. 170.
33. Особенности формирования толстостенного таврового соединения с применением высокотемпературной пайки и сварки плавлением / В. Н. Радзиевский, Ю. Ф. Гарцулов, Г. Г. Ткаченко, А. А. Бондарев // Свароч. пр-во. — 2001. — № 4. — С. 42–46.

The paper describes a number of ingenious technological developments made by specialists of the E.O.Paton Electric Welding Institute during a period from 1969 till 2003. Advantages of the electron beam welding process are shown by an example of specific structural materials. Recommendations on design of a welding process under industrial enterprise conditions are given. Examples of new technological developments, including welding of high-strength aluminium alloys, alloyed with lithium and scandium, welding of dissimilar and composite materials, are described.

Поступила в редакцию 19.07.2004



ВЛИЯНИЕ ГАЛОГЕНИДНЫХ ФЛЮСОВ НА ПОРИСТОСТЬ ШВОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛС

В. Н. ЗАМКОВ, д-р техн. наук, **Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ**, инж., **В. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук,
И. К. ПЕТРИЧЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Применение галогенидного флюса при ЭЛС титанового сплава позволяет на порядок снизить пористость в металле швов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановый сплав, галогенидный флюс, металлографические методы, пористость

Поры — характерный дефект швов, выполненных сваркой плавлением, на титановых сплавах. Изучению причин их возникновения посвящено большое количество работ, однако результаты исследований противоречивы. Установлено [1], что газовые пузырьки в сварочной ванне зарождаются, как правило, на торцах свариваемых кромок, а плотность сварных швов главным образом зависит от условий их движения в расплавленном титане. Это позволяет считать, что поры представляют собой пузырьки нерастворимых в расплавленном титане газов, не успевшие выделиться из сварочной ванны до ее затвердевания. При прочих равных условиях наиболее склонны к образованию пор швы, выполненные электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) [2]. Это, как правило, поры размером от 0,01 до 0,2 мм [3], обнаружить которые удается лишь металлографическими методами. Установлено, что количество и средний размер этих пор уменьшаются с понижением содержания водорода в основном металле. Однако даже при минимальной концентрации водорода в металле (0,001 мас. %), тщательной подготовке кромок и оптимальных режимах сварки они присутствуют в швах, выполненных ЭЛС. Поэтому можно предположить, что повышенная склонность последних к возникновению пор обусловлена кратковременностью существования металла в расплавленном состоянии и высокой скоростью кристаллизации. Определенную роль в образовании пор при ЭЛС может играть нестабильность парогазового канала и особенности локального взаимодействия электронного пучка с металлом, как это имеет место при лазерной сварке [4].

Наиболее действенным методом борьбы с пористостью в швах при дуговой сварке титана яв-

ляется применение галогенидных флюсов [5, 6]. Их положительное влияние на плотность швов обусловлено тем [6], что расплавленный флюс очищает кромки, разлагая влагу, адсорбированную на их торцах и поверхности, а в самой сварочной ванне интенсифицирует удаление пузырьков. В то же время флюс снижает вероятность появления газовых пузырьков в жидком металле [5]. Учитывая это, целесообразно определить возможность и эффективность применения галогенидных флюсов при ЭЛС для уменьшения пористости в титановых швах.

Для исследований использовали пластины из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) размером 300×100×12,5 мм, полученные прокаткой поковки из слитка вакуумно-дуговой плавки (ВДП) и слитка электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). После прокатки пластины подвергали отжигу при температуре 700 °C в течение 1 ч для снятия напряжений. Химический состав и механические свойства основного металла приведены в табл. 1. Различие механических свойств металла ВДП и ЭЛПЕ в данном случае обусловлено разным содержанием в нем алюминия и кислорода, а также разной степенью деформации при прокатке.

Сварку образцов выполняли электронно-лучевым способом в установке УЛ-144, оснащенной энергоблоком ЭЛА 60/60. Для совмещения электронного луча со стыком использовали прибор СУ 220. Имитацию вывода кратера осуществляли, дискретно уменьшая сварочный ток (от номинального значения до нуля) в определенных точках, расположенных на отрезке шва заданной длины путем программируемого управления источником питания. Пористость швов оценивали по результатам рентгенопросвечивания сварных соединений и данным металлографического анализа продольных микрошлифов в трех характерных участках

Таблица 1. Химический состав и механические свойства титанового сплава ВТ-6

Метод плавки сплава	Массовая доля легирующих элементов и газов, %					Механические свойства сплава*				
	Al	V	[N]	[O]	[H]	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV , Дж/см ²
ВДП	5,5	4,0	0,020	0,08	0,0024	950	830	12	27	43
ЭЛПЕ	6,0	3,9	0,010	0,15	0,0018	1004	970	13	30	36

* Средние значения по результатам испытания пяти образцов.

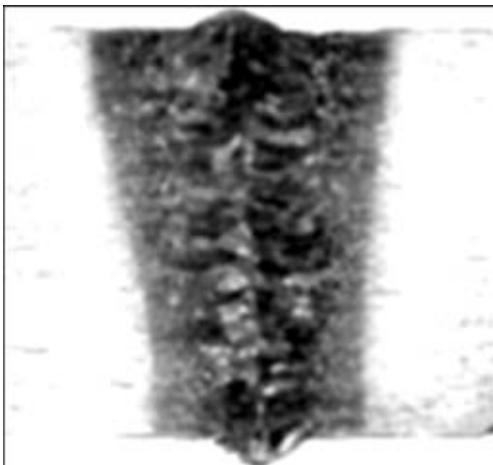


Рис. 1. Макроструктура сварного соединения сплава ВТ6, выполненного ЭЛС на оптимальном режиме, $\times 3$

шва — по зоне сплавления, оси шва и посередине между ними. Для сравнительной количественной оценки пористости швов использовали методику, предложенную в работе [3]. При сварке применяли флюс марки АНТ-23А (ТУУ 05416923.002-95).

При выборе режима сварки ($U_{yck} = 60$ кВ, $I_{cb} = 90$ мА, частота сканирования 170 Гц, диаметр развертки 4 мм, $v_{cb} = 25$ м/ч) исходили из необходимости обеспечить удовлетворительное формирование лицевой стороны и корня шва и отсутствие в нем дефектов по данным рентгенопросвечивания (рис. 1). Оптимальное формирование шва на участке вывода кратера получено при ступенчатом (20 ступеней) снижении сварочного тока от 90 мА до нуля в течение 10 с, т. е. на участке длиной 70 мм.

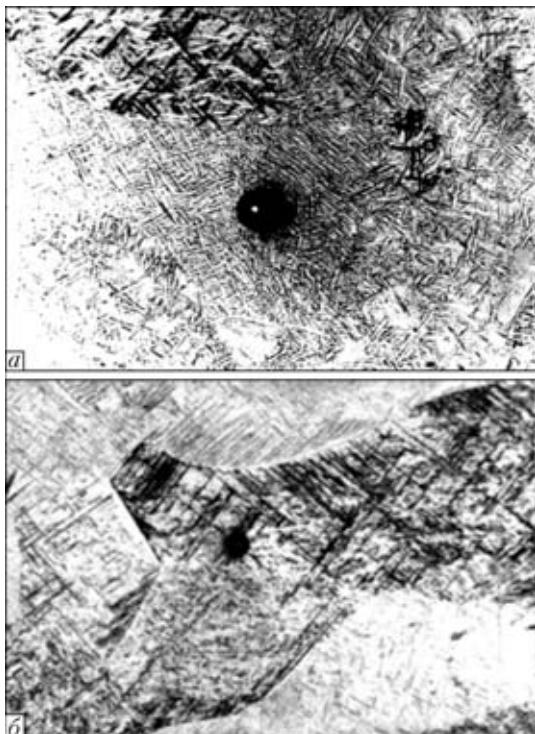


Рис. 2. Микропоры в сварных швах, выполненных ЭЛС: а — зона сплавления, металл ВДП, $\times 200$; б — вблизи оси шва, металл ЭЛПЕ, $\times 200$

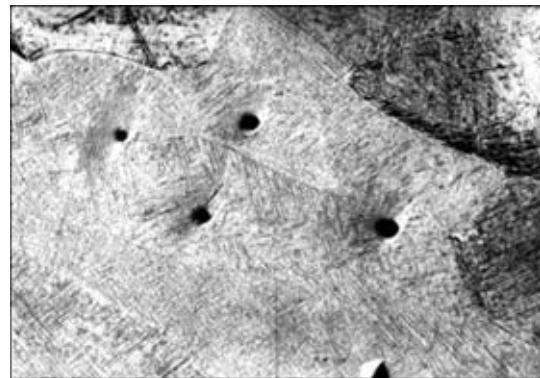


Рис. 3. Группа микропор в электронно-лучевом металле шва (основной металл ЭЛПЕ), $\times 200$

Первые опыты по ЭЛС с применением флюса выполняли по той же технологии, что и при дуговой сварке, т. е. флюс наносили в виде спиртовой суспензии на поверхность уже подготовленного к сварке стыка в количестве около 13 мг/см². Визуальный осмотр выполненных таким образом сварных соединений показал неудовлетворительное формирование швов, а рентгенопросвечивание зафиксировало значительное количество внутренних дефектов различного размера. По результатам металлографического анализа они представляли собой полости, внутри которых в ряде случаев наблюдались частицы шлака. Когда же флюс перед сваркой наносили только на торцы кромок, то количество дефектов резко уменьшалось. Если при этом количество

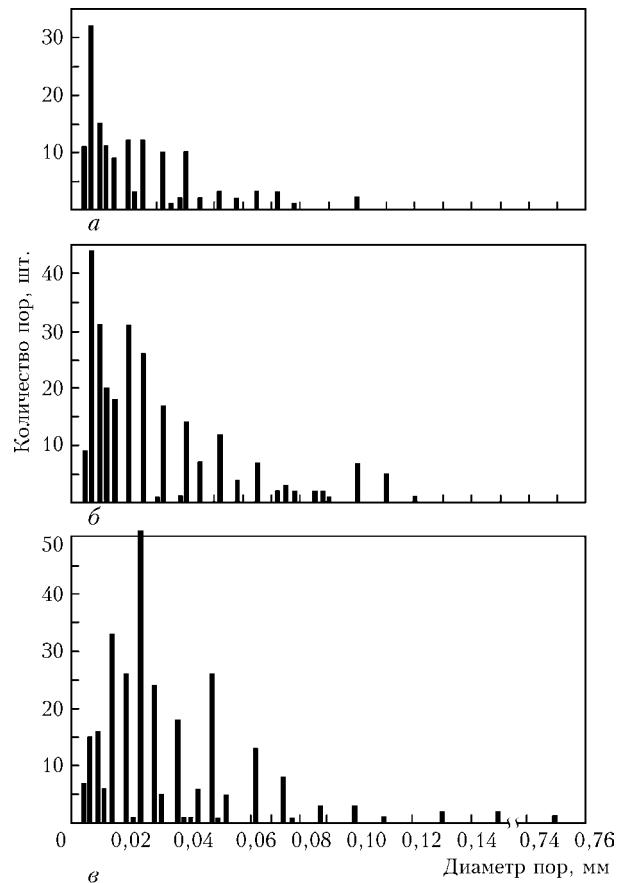


Рис. 4. Гистограммы распределения пор в швах, выполненных ЭЛС (длина шва 250 мм) на металле ЭЛПЕ: а — зона сплавления; б — между зоной сплавления и осью шва; в — по оси шва

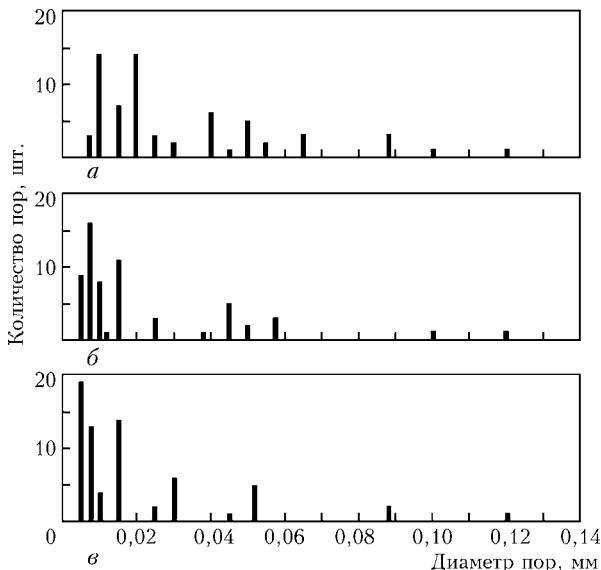


Рис. 5. Гистограммы распределения пор в швах, выполненных ЭЛС с применением флюса АНТ-23А (длина шва 270 мм): а—в — то же, что и на рис. 4

флюса составляло около $3 \text{ мг}/\text{см}^2$, то методом рентгенопросвечивания дефекты в швах вообще не обнаруживали. Эксперименты показали, что независимо от способа выплавки сплава флюс в оптимальном количестве (около $3 \text{ мг}/\text{см}^2$) не оказывает влияния на формирование швов и стабильность процесса сварки. Это подтвердило результаты предварительных исследований, согласно которым флюс при ЭЛС может влиять лишь на металлургические процессы в сварочной ванне и никак не сказывается на пространственно-энергетические характеристики электронного пучка.

Для дальнейших исследований на выбранном режиме сварки (без флюса и с флюсом) выполнены сварные образцы, включая участки вывода кратера. Рентгеновский контроль не выявил в них каких-либо дефектов, однако при металлографических исследованиях в металле швов обнаружены мелкие поры. Встречаются единичные микропоры (рис. 2), иногда наблюдаются группы пор (рис. 3).

Для обобщения результатов металлографических исследований продольных сечений швов строили гистограммы распределения пор по их раз-

Таблица 2. Влияние способа сварки на содержание примесей в металле шва

Метод плавки сплава	Способ сварки	Содержание примесей в шве, мас. %		
		C	[O]	[H]
ВДП	ЭЛС	0,018	0,076	0,0021
	ЭЛС с флюсом	0,019	0,079	0,0020
ЭЛПЕ	ЭЛС	0,011	0,160	0,0017
	ЭЛС с флюсом	0,011	0,160	0,0016

мерам (рис. 4). Анализ гистограмм показал, что во всех исследованных сечениях преобладают поры, размер которых не превышает 0,06 мм. С увеличением диаметра микропор их количество уменьшается. В сварных соединениях металла ЭЛПЕ поры наблюдали преимущественно в центральной части швов, где больше их количество и размеры (см. рис. 4, а–в). Максимальная пористость в швах металла ВДП имела место в зоне сплавления при таком же общем уровне пористости. В то же время полученные данные не позволяют сделать однозначный вывод о каком-либо влиянии способа выплавки металла на характер распределения пор в швах.

Для сравнительной количественной оценки пористости использовали выражение [3]

$$\alpha = \frac{\pi(R_1^2 n_1 + R_2^2 n_2 + \dots + R_i^2 n_i)100}{S},$$

где R_1, R_2, \dots, R_i — радиусы пор; n_1, n_2, \dots, n_i — количество пор данного радиуса; S — площадь поверхности исследуемого образца.

В начале определяли пористость металла шва по всей длине шва, т. е. процентное отношение площади, занятой порами, к площади поверхности исследуемого образца ($\alpha_{cp1}, \alpha_{cp2}, \alpha_{cp3}$), а затем среднюю пористость шва или участка вывода кратера. Установлено, что усредненная пористость в сечении однопроходного шва, выполненного ЭЛС на сплаве ВТ6, составляет 0,012 %, а в участке вывода кратера — от 0,025 до 0,055 %, т. е. дефектность этого участка была значительно больше.

Как отмечалось ранее, применение флюса АНТ-23А при ЭЛС никак не повлияло на стабильность процесса сварки и формирование швов. Однако наличие флюса в зоне сварки привело к существенному уменьшению, фактически на порядок, количества пор в швах (рис. 5), в том числе на участке вывода кратера (рис. 6). Значительно уменьшились и размеры пор. Усредненная пористость в сечении однопроходного шва и в участке вывода кратера при сварке с флюсом составила 0,0017 %.

В швах, выполненных ЭЛС и ЭЛС с применением флюса, содержание таких примесей, как углерод, кислород, водород (которые могут быть причиной возникновения пор) [3, 7], практически одинаково (табл. 2). И хотя содержание водорода в швах несколько меньше, чем

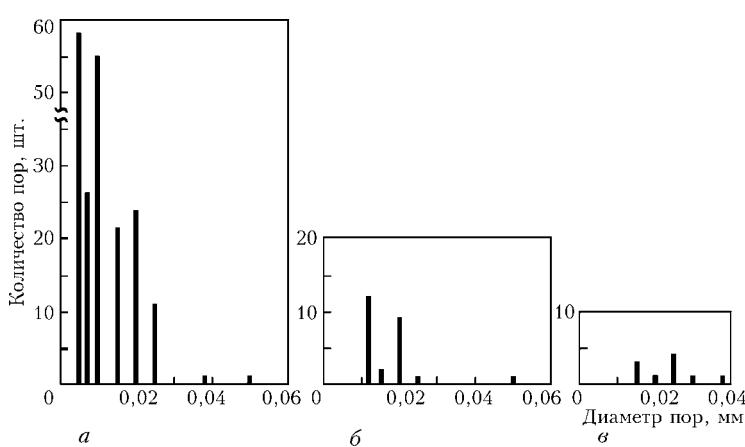


Рис. 6. Гистограммы распределения пор в металле шва длиной 60 мм (на участке вывода кратера), выполненным ЭЛС с применением флюса: а—в — то же, что и на рис. 4



в основном металле (табл. 1, 2), это типично для титановых швов, выполненных сваркой плавлением [5]. Поэтому влияние флюса на пористость швов не связано с преимущественным удалением, например, водорода из сварочной ванны. Сравнив концентрацию кислорода и углерода в основном металле и металле швов (табл. 1, 2), можно утверждать, что при ЭЛС образование пузырьков CO в результате взаимодействия углерода и кислорода в сварочной ванне [6] вообще не имеет места. Существенное уменьшение пористости в сварных швах, выполненных с использованием галогенидного флюса, вероятнее всего, является следствием более интенсивного удаления пузырьков из жидкого титана.

Выходы

1. В швах титанового сплава BT6, выполненных ЭЛС, наблюдается большое количество мелких пор, диаметр которых не превышает 0,2 мм. Возникновение пористости не связано с методом выплавки сплава.

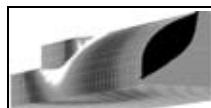
2. Для уменьшения пористости сварных швов при ЭЛС титана рекомендуется использовать га-

Application of halogenide flux in EBW of titanium alloys allows reducing porosity in the weld metal by an order of magnitude.

логенидный флюс. Установлено, что применение флюса марки АНТ-23А не влияет на формирование швов и стабильность процесса сварки. Количество пор при этом уменьшается на порядок.

1. Муравьев И. И., Холошин А. Л. Влияние режимов сварки на пористость металла шва некоторых титановых сплавов // Свароч. пр-во. — 1979. — № 6. — С. 18–19.
2. Плотность металла швов на техническом титане BT1-0, выполненных различными способами сварки // Т. В. Голуб, О. Н. Кашевская, В. Н. Замков и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 11. — С. 31–33.
3. Замков В. Н., Шевелев А. Д. Образование пор в сварных соединениях титанового сплава BT6, выполненных ЭЛС // Там же. — 1979. — № 12. — С. 50–54, 57.
4. Katayama S., Mizutani M. Elucidation of laser welding phenomena and porosity formation mechanism // Trans. JWRI. — 2003. — 32, № 1. — P. 67–69.
5. Замков В. Н., Цейгер Е. Н. Влияние фторидных флюсов на пористость швов при сварке титана в аргоне неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1983. — № 4. — С. 34–38.
6. Редиц В. В., Никифоров Г. Д., Вакс М. А. Предупреждение пор в сварных швах тонколистового титана и его сплавов // Свароч. пр-во. — 1974. — № 4. — С. 7–10.
7. Петров Г. Л., Хатунцев А. Н. Роль химических реакций в формировании пор при сварке титановых сплавов // Там же. — 1975. — № 8. — С. 57–58.

Поступила в редакцию 06.04.2004



5-я Всероссийская виртуальная конференция «Компьютерные технологии в соединении материалов – 2004»

Международный центр «Компьютерные высокие технологии в соединении материалов» Тульского государственного университета организует 5-ю Всероссийскую конференцию «Компьютерные технологии в соединении материалов – 2004», которая является Первой международной электронной конференцией. Проведение конференции приурочено к десятилетию успешной работы центра, которая состоится 14 апреля 2005 г. Создание центра совпало с периодом бурного развития компьютерной техники и математического моделирования, позволившим выявить многие проблемы в теоретических и практических знаниях и частично устранить их. Этой актуальной проблеме и посвящена виртуальная конференция, информацию о которой можно найти на сайте comhigh-tech.tsu.tula.ru/weldsim. Труды конференции будут изданы к юбилею центра в апреле 2005 г. Для международного вычислительного сварочного сообщества все статьи, включенные в труды конференции, будут свободно доступны через Интернет в декабре 2004 г.

Материалы для участия в конференции просьба направлять в адрес Оргкомитета до 30 ноября 2004 г.

Вице-председатель Оргкомитета,
Директор Центра «ComHighTech в соединении материалов»
проф. Судник В. А.

Тел./факс: (0872) 33-17-85

Тел.: 33-12-58

E-mail: sudnik@oitsp.tsu.tula.ru/weldsim

Кафедра оборудования и технологии сварочного и литейного производства
Тульского государственного университета
300600, г. Тула, просп. Ленина, 92



ВЛИЯНИЕ УГЛЕВОДОРДНЫХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ ФАКЕЛА

В. Н. КОРЖ, д-р техн. наук, Ю. С. ПОПИЛЬ, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Определены границы перехода от ламинарного к турбулентному характеру течения продуктов горения смеси, производимой электролизно-водяными генераторами в зависимости от добавок в смесь паров углеводородных соединений. Рассмотрено распределение температуры по длине факела пламени для разных характеров течения струи продуктов горения и добавок в смесь паров углеводородных соединений. Показаны условия возможного использования водородно-кислородного пламени при газопламенном напыления.

Ключевые слова: газопламенное напыление, водородно-кислородное пламя, электролизно-водяной генератор, ламинарное и турбулентное течение, температура пламени, скорость истечения потока

Перспективными методами борьбы с коррозией и износом являются способы газотермического нанесения покрытий, в частности, газопламенного напыления. Последний состоит в формировании на поверхности изделия слоя из частиц напыляемого материала, которые имеют необходимый запас тепловой и кинетической энергии для получения покрытия вследствие взаимодействия со струей продуктов горения газового пламени.

Одной из задач ресурсосбережения является применение вместо дефицитного ацетилена его заменителей. Особый интерес вызывает возможность использования для процессов газопламенной обработки материалов экологически чистого водорода [1, 2].

Цель работы, проведенной на кафедре восстановления деталей машин НТУУ «КПИ», заключалась в исследовании тепловых характеристик водородно-кислородного пламени (ВКП) при сжигании газовой смеси, вырабатываемой электролизно-водяными генераторами, применительно к использованию газопламенного напыления.

Качество покрытия при газотермических способах нанесения покрытия в основном определяется такими факторами, как температура напыляемых частиц и их скорости. В указанном исследовании основное внимание уделено таким характеристикам ВКП, как его строение и характер горения, распределение температуры по длине факела пламени.

Характер течения струи продуктов горения водородно-кислородной смеси (ВКС) определяется числом Рейнольдса (Re), которое оценивает ламинарность или турбулентность потока продуктов горения пламени при разных расходах, составах газовых смесей и диаметрах выходных отверстий мундштуков горелки [3]. Переход режима горения диффузионного факела в неподвижной газовой среде от ламинарного к турбулентному зафиксирован для разных газов при разных значениях Re . Число Рейнольдса определяли [4] средней скоростью U_m

газового потока на срезе выходного диаметра мундштука горелки для напыления

$$Re = \frac{U_m d}{v},$$

где v — кинематическая вязкость газа или газовой смеси, $\text{м}^2/\text{s}$ (для ВКС, состоящей из 30 % O_2 + 70 % H_2 $v = 36,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{s}$); d — диаметр выходного канала мундштука горелки, м.

Среднюю скорость истечения горючей смеси из мундштука горелки можно определить из такой формулы [5]:

$$U_m = 354 \frac{V_{\text{г.с}}}{d^2},$$

где $V_{\text{г.с}}$ — расход газовой смеси, $\text{м}^3/\text{ч}$; 354 — эмпирический коэффициент.

Для максимальной длины факела (около 400 мм) средняя скорость газового потока на срезе сопла при сжигании ВКС в зависимости от номера мундштука горелки и расхода газа составляет от 50 до 80 м/с (рис. 1). Причем, начало переходной области истечения газовой струи продуктов горения от ламинарного к турбулентному для горелки диаметром выходного канала мундштука 1,6 мм начинается при скорости истечения струи из мундштука примерно 80 м/с, горелки диаметром выходного канала мундштука 2,0 мм — примерно при 60 м/с и диаметром 2,2 мм — примерно при 50 м/с. Полная турбулизация факела пламени про-

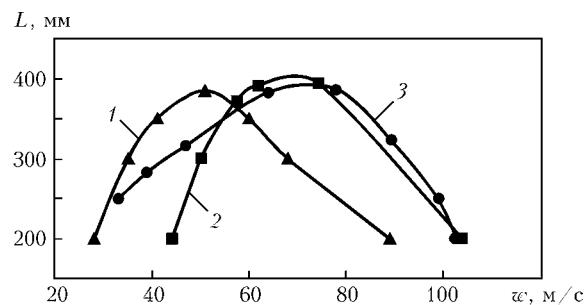


Рис. 1. Зависимость длины факела от средней скорости w истечения потока продуктов горения: 1 — ВКС+бензин; 2 — ВКС+спирт; 3 — ВКС



исходит при использовании мундштуков диаметром выходного канала 1,6 мм, при скоростях истечения из мундштука приблизительно 125 м/с, диаметром выходного канала 2,0 мм примерно при 70 м/с, диаметром 2,2 мм при 80 м/с.

Анализ полученных результатов показал, что для чистой ВКС переход от ламинарного течения продуктов горения к турбулентному происходит при скорости истечения струи горючей смеси из мундштука наконечника, соответствующей $Re \approx 3500$, что довольно близко к приведенному в работе [6] $Re = 3 \cdot 10^3$ для переходной области течения газового потока.

Как следует из работы [7], регулирование восстановительно-окислительного потенциала пламени, полученного при сжигании смеси, которая вырабатывается электролизно-водяными генераторами, происходит за счет добавления в ВКС паров углеводородных соединений путем барботирования горючей смеси через спирт, бензин и другие углеводородные соединения.

Добавление в ВКС 5,5 об. % паров бензина способствует увеличению теплосодержания продуктов горения пламени при сжигании 1 м³ горючей смеси от 6,75 до 17,15 МДж/м³. При введении 16 об. % паров этилового спирта теплосодержание продуктов горения составляет 14,7 МДж/м³.

При добавлении в ВКС приблизительно 5,5 об. % паров бензина или около 16 об. % этилового спирта сохраняется закономерность образования в области стабильного горения пламени ламинарного и турбулентного характера течения потока продуктов горения пламени.

Анализ средней скорости истечения потока смеси ВКС+пары бензина на срезе мундштука показал, что переход характера горения от ламинарного к

турбулентному для всех наконечников горелки с диаметрами выходного канала от 1,6 до 2,2 мм находится в пределах 50...55 м/с (рис. 1).

Для струи продуктов горения ВКС с добавкой 5,5 об. % паров бензина переход от ламинарного к турбулентному характеру течения потока происходит при скорости истечения струи горючей смеси из мундштука горелки, отвечающей $Re \approx 3000$.

Переход к турбулентному характеру течения продуктов горения горючей смеси ВКС+пары бензина происходит при меньших скоростях истечения из горелки по сравнению с потоком ВКС и отвечает меньшим значениям числа Рейнольдса. Это можно объяснить повышением кинематической вязкости газовой смеси за счет добавления в смесь паров бензина.

При переходе от ламинарного к турбулентному характеру течения потока продуктов горения скорость истечения из мундштука горелки газового потока горючей смеси ВКС+16 об. % паров спирта для горелки диаметром выходного отверстия мундштука 1,6 мм составляет примерно 80 м/с (рис. 1). На больших диаметрах выходных отверстий мундштука (2,0...2,2 мм) изменение характера течения продуктов горения происходит при практически одинаковой скорости истечения потока из мундштука горелки (примерно 65 м/с). Эти скорости выше по сравнению с аналогичными скоростями, полученными при добавлении в ВКС паров бензина.

Анализ газодинамического состояния струи продуктов горения смеси ВКС+16 об. % паров этилового спирта показал, что начало перехода к турбулентному характеру течения продуктов горения происходит при скоростях истечения струи

Таблица 1. Характеристики элементов факела пламени

Состав горючей смеси; характер течения потока продуктов горения	Диаметр отверстия мундштука горелки, мм	Расход газовой смеси дм ³ /ч	Скорость истечения струи горючей смеси, м/с	Длина факела, мм	Длина ядра, мм*	Ширина факела, мм*
ВКС; ламинарный	1,6	300...600	40...80	200...400	5,0	7
	2,0	400...620	30...60	200...415	6,0	8
	2,2	400...700	30...50	200...400	7,0	9
ВКС; турбулентный	1,6	600...760	80...125	400...200	7,0	9
	2,0	620...820	60...70	415...200	8,0	10
	2,2	700...1100	50...80	400...200	9,0	12
ВКС+бензин; ламинарный	1,6	200...400	25...55	200...390	6,5	11
	2,0	300...520	35...50	200...400	7,0	12
	2,2	310...720	35...50	200...400	11,0	13
ВКС+бензин; турбулентный	1,6	400...780	55...100	390...200	11,0	14
	2,0	520...900	50...90	400...200	11,5	14
	2,2	720...1220	50...90	400...200	12,0	15
ВКС+спирт; ламинарный	1,6	400...600	55...80	200...400	5,0	12
	2,0	420...780	35...65	200...400	7,0	12
	2,2	520...900	40...65	200...400	11,0	13
ВКС+спирт; турбулентный	1,6	600...920	80...125	400...200	11,0	13
	2,0	780...1180	65...105	400...200	11,5	14
	2,2	900...1250	65...195	400...200	11,5	15

* Длина ядра и ширина факела указаны для максимальных расходов газовой смеси.



горючей смеси из наконечника, отвечающих $Re \approx 4250$.

При турбулизации газового потока уменьшается длина факела, увеличивается угол раскрытия потока продуктов горения и ядра факела. Изменения геометрических размеров элементов факела пламени в зависимости от состава и расходов горючих смесей представлены в табл. 1.

Анализ влияния средних скоростей истечения потока горючих газовых смесей из мундштука горелки показал, что границы устойчивого горения чистого ВКП находятся в диапазоне 30...125 м/с, а граница перехода от ламинарного характера течения потока продуктов горения к началу турбулентного течения продуктов горения — при средней скорости истечения струи более 60 м/с, что отвечает скорости истечения струи горючей смеси из мундштука горелки $Re \approx 3500$.

Устойчивое горение смеси ВКС с добавками 5,5 об. % паров бензина зафиксировано при скоростях истечения горючей смеси из мундштука горелки от 25 до 100 м/с. Граница перехода от ламинарного характера течения потока продуктов горения к турбулентному находится при средней скорости истечения струи горючей смеси из сопла горелки более 55 м/с, отвечающей $Re \approx 3000$.

Устойчивое горение смеси ВКС с добавками 16 об. % паров этилового спирта происходит при скоростях истечения горючей смеси из мундштука горелки в пределах 35...125 м/с. Граница перехода от ламинарного характера горения к началу турбулизации потока продуктов сгорания зафиксирована при скорости истечения из мундштука горелки более 65 м/с, что отвечает скорости истечения струи горючей смеси из горелки $Re \approx 4200$.

На качество покрытий при газотермическом напылении материалов в значительной мере влияет температура частиц напыляемого материала. При газопламенном напылении температура частиц зависит от длины эффективного участка факела пламени, на котором возможен нагрев частиц до температуры плавления. Нагрев частиц материала до температуры плавления конвективным теплообменом между продуктами горения пламени и напыляемыми частицами возможен при температуре продуктов горения в факеле более 300 °C [8].

С учетом этого длина эффективного участка факела пламени для металлов, плавящихся при температуре до 950 °C (например, медь, латунь, бронза), будет определяться изотермой температуры 1250 °C. Для металлов с температурой плавления до 1200 °C длина эффективного участка определяется изотермой температур около 1500 °C. Для порошковых материалов на основе железа и других металлов с температурой плавления до 1500 °C длина эффективного температурного участка определяется изотермой температуры около 1750 °C.

Для установления длины эффективных участков факела пламени исследовали распределение температуры по длине факела в зависимости от характера горения пламени и состава горючей смеси. Здесь можно выделить две области: высоко-

температурную, определяемую длиной ядра и зоной нормального распространения пламени (средняя зона), где температура пламени достигает своего максимального значения, и область догорания, расположенную за зоной нормального распространения пламени, где температура пламени существенно снижается.

Максимальная температура в высокотемпературной зоне ВКП, вычисленная экспериментально-расчетным методом, составляет около 3110 °C [1].

При добавлении в ВКС паров углеводородных соединений появляется тенденция к уменьшению максимальной температуры в высокотемпературной зоне (приблизительно до 3100 °C при сжигании смеси ВКС с 5,5 об. % паров бензина и до 3080 °C при сжигании смеси ВКС с 16 об. % паров этилового спирта) [1].

Анализируя распределение температуры по длине факела пламени, находим длину эффективных участков, в которых температура выше температуры плавления напыляемого материала на 300 °C. Для этого выделяем три температурных интервала по длине факела пламени: от максимальной температуры пламени до 1750 °C, от максимальной до 1500 °C, от максимальной до 1250 °C.

Распределение температуры по длине факела пламени (рис. 2, а) показало, что первых два участка температур имеют большую длину при турбулентном течении потока продуктов горения, третий участок длиннее при ламинарном характере течения потока.

Введение в горючую смесь 5,5 об. % паров бензина приводит к изменению распределения температуры по длине факела (рис. 2, б). Кроме того, в этом случае можно заметить тенденцию к увеличению длины температурных участков по сравнению с пламенем при сжигании чистой ВКС. Это можно объяснить тем, что в факеле за высокотемпературной областью происходит догорание излишка топлива. Если при введении 5,5 об. % паров бензина в ВКС в ядре и в приядерной зоне пламени максимальная расчетная температура ниже, чем при сгорании чистой ВКС, то в области догорания температура повышается. Относительное снижение кислорода в составе горючей смеси снижает максимальную температуру в высокотемпературной зоне, а в области догорания (за счет дополнительного окисления горючего кислородом из воздуха) происходит повышение температуры в этой зоне и увеличение длины третьего участка.

При турбулентном характере течения продуктов горения горючей смеси ВКС+ 5,5 об. % паров бензина длина эффективных участков температур имеет заметную тенденцию к увеличению по сравнению с ламинарным характером течения только для первого участка и сохраняет тенденцию к увеличению третьего участка эффективных температур для ламинарного характера течения.

Анализ длины эффективных участков температур при добавлении в ВКС до 16 об. % паров (рис. 2, в) этилового спирта показывает увеличение всех рассмотренных выше эффективных участков факела пламени как для ламинарного, так и для турбулентного характера течения потока

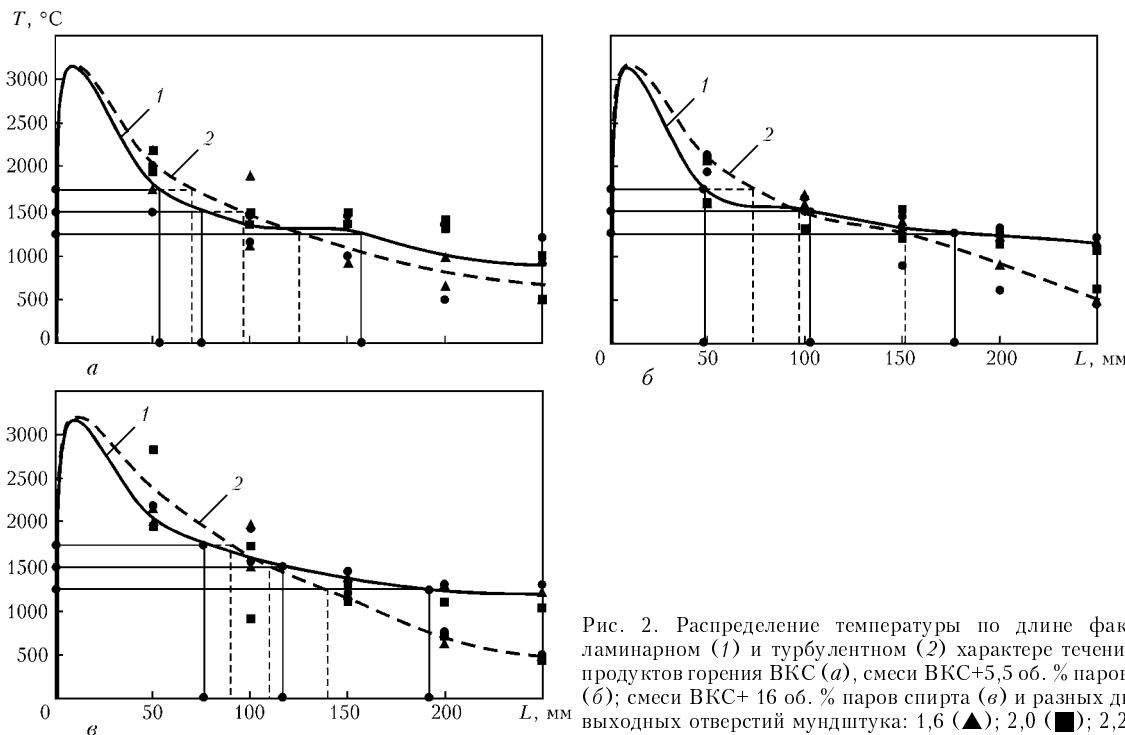


Рис. 2. Распределение температуры по длине факела при ламинарном (1) и турбулентном (2) характере течения потока продуктов горения ВКС (а), смеси ВКС+5,5 об. % паров бензина (б); смеси ВКС+ 16 об. % паров спирта (в) и разных диаметрах выходных отверстий мундштука: 1,6 (▲); 2,0 (■); 2,2 (●) мм

Таблица 2. Длина эффективных участков температур по длине факела пламени

Состав горючей смеси	Характер течения потока продуктов горения	Температурный интервал, °C	Длина эффективного температурного участка, мм	Температурный интервал, °C	Длина эффективного температурного участка, мм	Температурный интервал, °C	Длина эффективного температурного участка, мм
VKC	Ламинарный	3110...1750	55	3110...1500	75	3110...1250	150
	Турбулентный		70		95		125
VKC+5,5 об. % паров бензина	Ламинарный	3100...1750	50	3100...1500	100	3100...1250	175
	Турбулентный		75		100		150
VKC+16 об. % паров спирта	Ламинарный	3080...1750	75	3080...1500	110	3080...1250	190
	Турбулентный		90		110		140

продуктов горения, по сравнению с факелом пламени, полученным при сжигании чистой ВКС. Сохраняется тенденция к увеличению длины первого эффективного участка пламени при турбулентном характере течения по сравнению с ламинарным; сокращение третьего эффективного участка пламени при турбулентном характере течения по сравнению с ламинарным.

Результаты исследований распределения температур по длине факела пламени в зависимости от состава смесей и характера горения ВКП (табл. 2) показали, что больше длина участка факела температурами выше 1500 °C при турбулентном, а ниже 1500 °C — при ламинарном характере течения.

При введении в горючую смесь паров углеводородных соединений зафиксирована тенденция к увеличению длины рассмотренных эффективных температурных участков. Причем, с введением в ВКС паров спирта она проявляется больше.

Выводы

1. При добавлении углеводородных соединений в ВКС границы перехода от ламинарного к турбулентному характеру течения струи продуктов

горения смещаются в сторону меньших скоростей потока. При этом увеличивается длина участков температур, при которых частицы напыляемого материала могут достигать температуры плавления.

2. Для газопламенного напыления порошковых материалов с температурой плавления до 1000 °C большая вероятность получения качественного покрытия при использовании пламени, полученного при сжигании смеси, вырабатываемой электролизно-водяными генераторами, с добавкой в ВКС 5,5 об. % паров бензина или 16 об. % паров этилового спирта, и ламинарном характере течения струи продуктов горения. Для напыления порошковых материалов с температурой плавления выше 1000 °C вероятность получения удовлетворительного качества напыленного слоя выше при использовании пламени, полученного от сжигания смеси ВКС+16 об. % паров спирта или смеси ВКС+5,5 об. % паров бензина с турбулентным характером течения струи продуктов горения.

1. Корж В. М., Попіль Ю. С. Керування параметрами процесу горіння воднево-кисневого полум'я при газополумінієвій обробці матеріалів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2002. — № 4. — С. 81–91.
2. Корж В. М., Попіль Ю. С., Глуховський В. Ю. Дослідження теплових та кінетичних характеристик факел-



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

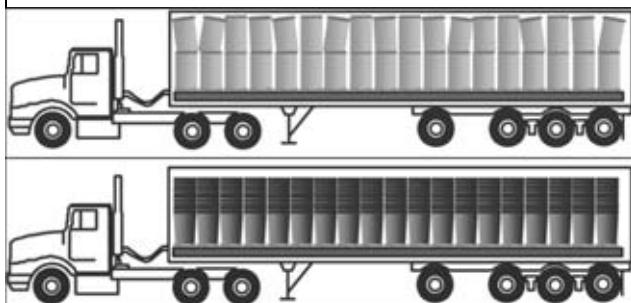
- лу воднево-кисневого полум'я при нанесенні покриття // Пробл. техніки. — 2002. — №2. — С. 61–66.
3. Дыбен Е. П., Мазур А. К. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. — Киев: Наук. думка, 1982. — 363 с.
 4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М., 1976. — 888 с.
 5. Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л. Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов. — М.: Машиностроение, 1974. — 312 с.
 6. Брюханов О. Н. Микрофакельное горение газов. — Л.: Недра, 1983. — 192 с.
 7. Корж В. Н. Регулирование характера горения горючей газовой смеси добавкой жидких углеводородных соединений // Автомат. сварка. — 1983. — № 11. — С. 65–66, 69.
 8. Применение газов-заменителей ацетилена при газопламенной обработке металлов / Под ред. И. А. Антонова. — М.: Машиностроение, 1964. — 150 с.

Boundaries are determined for transition from the laminar to turbulent nature of the flow of combustion products of a mixture, produced by water electrolyses generators, depending on additives to a mixture of vapours of hydrocarbon joints. Considered is the temperature distribution along the flame length for different modes of the flow of a jet of combustion products and mixture of vapours of hydrocarbon compounds. Conditions of the possible use of the hydrogen-oxygen flame are shown.

Поступила в редакцию 29.04.2004

ПОЛЕЗНО ЗНАТЬ

УПАКОВКА ПРОВОЛОКИ В КОНУСООБРАЗНЫЕ БОЧКИ



Фирма К. «Дариус Текнолоджиз» (Франция) разработала новую технологию упаковки проволоки в конические бочки.

Преимущества: пустые бочки можно складывать в стопки по 10 шт. или больше, что снимает острую проблему их утилизации; для хранения пустых бочек требуется мало места, их можно возвратить на волочильный завод за очень небольшую плату; расходы по хранению пустых барабанов и их сборку уменьшаются в пять раз.

Особенности: при этом новом процессе витки проволоки укладываются определенным образом, соответствующим конической форме бочки. Специально подогнанное удерживающее кольцо обеспечивает плавную размотку без заедания. Никакая перестройка оборудования не требуется ни у заказчика, ни у конечного пользователя.

Предполагается, что новый процесс, по которому подана заявка на патент, обеспечит прорыв в технологии использования сварочной проволоки.

«Дариус Текнолоджиз» — фирма-консультант, специализирующаяся на разработке новой продукции в области металлургии. Фирма предоставляет такие услуги по разработке продукции, как изучение рынка, руководство проектом, поиск партнера, реклама, связь и подготовка персонала.

Более детальную информацию можно найти по адресу:
 lm.darius@wanadoo.fr
<http://perso.wanadoo.fr/dariustechologies>.



УДК 621.791.92

ПОВЫШЕНИЕ СКЛОНОСТИ НАПЛАВЛЕННОЙ СТАЛИ 110Г13Л К ДЕФОРМАЦИОННОМУ УПРОЧНЕНИЮ

К. А. ВАЛИЦ, С. Ю. ПАСЕНЧИК, кандидаты техн. наук (Донец. нац. техн. ун-т)

Установлено, что электрошлаковая наплавка высокомарганцевой стали 110Г13Л, помимо восстановления геометрии деталей и их служебных свойств, позволяет существенно повысить склонность стали к деформационному упрочнению. Последнее повышает износостойкость металла и эксплуатационную долговечность деталей.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, сталь 110Г13Л, зубья экскаваторов, ударно-динамическое воздействие, деформация, упрочнение, износ, микротвердость, линии скольжения, дислокации, износостойкость

После электрошлаковой наплавки (ЭШН) изношенных зубьев ковшей карьерных экскаваторов ЭКГ-8И и ЭКГ-12,5 неоднократно наблюдали повышение работоспособности восстановленных зубьев по сравнению с серийными литыми [1–3]. В качестве расходуемого электрода при ЭШН использовали часть запредельно изношенного зуба (т. е. наплавленный и основной металлы представляли собой высокомарганцевую сталь 110Г13Л), что крайне важно для работы зубьев в условиях тяжелых скальных забоев высокой твердости при повышенных ударно-динамических нагрузках. Как известно, указанная сталь отличается высокой ударной вязкостью и склонностью к деформационному упрочнению (соотношение микротвердости до и после деформации).

Выполнены сравнительные исследования характеристик деформационного упрочнения стали 110Г13Л в исходном литом состоянии и наплавленного металла после ЭШН с использованием стандартного АНФ-6 и разработанного флюса [4]. Все образцы подвергали термической обработке, принятой для стали 110Г13Л.

Склонность стали к деформационному упрочнению изучали при динамическом сжатии по методике, описанной в работе [5]. Испытуемый образец представлял собой трехгранную призму высотой 5 мм, которую получали при резке квадрата по его диагонали. Динамическую нагрузку прикладывали к ребру призмы. Значения энергии удара выбирали в диапазоне 25...75 Дж, поскольку при энергии удара 25 Дж упрочнение стали 110Г13Л становится заметным, а при 75 Дж уже после первого удара достигается максимальное упрочнение.

Образцы для исследований вырезали из рабочей поверхности изношенных серийных и восстановленных зубьев ковшей экскаваторов. Металлографические исследования изношенных поверхностей зубьев выполняли с помощью микроскопа МИМ-8М и твердомера ПМТ-3, магнитные исследования — с помощью альфа-фазометра.

Результаты исследований приведены на рис. 1, из которого видно, что степень упрочнения стали 110Г13Л возрастает от 2,30 в исходном литом со-

стоянии до 2,70 и 3,09 с применением ЭШН соответственно флюсом АНФ-6 и разработанным.

Максимальную степень упрочнения литая сталь 110Г13Л приобретает при энергии удара 50 Дж и трехкратном ударе, а наплавленная сталь — после ЭШН (независимо от применяемого флюса) при энергии удара 50 Дж и пятикратном ударе.

Изучение микроструктуры поверхностного упрочненного слоя изношенных серийных литых и восстановленных с помощью ЭШН зубьев показало, что степень упрочнения наплавленного металла выше, чем литого. На рис. 2 видны линии скольжения, свидетельствующие об упрочнении стали в процессе работы зубьев ковша в забое. Увеличение количества линий скольжения и уменьшение расстояния между ними после ЭШН с применением разработанного флюса подтверждает более высокую склонность стали к упрочнению по сравнению с литой сталью и наплавленной ЭШН с применением флюса АНФ-6.

С помощью металлографических и магнитометрических исследований изношенных поверхностей зубьев магнитные фазы в упрочненном слое выявлены не были. Следовательно, согласно данным работ [6, 7], высокая степень упрочнения наплавленной стали 110Г13Л связана с образованием дефектов кристаллического строения (дис-

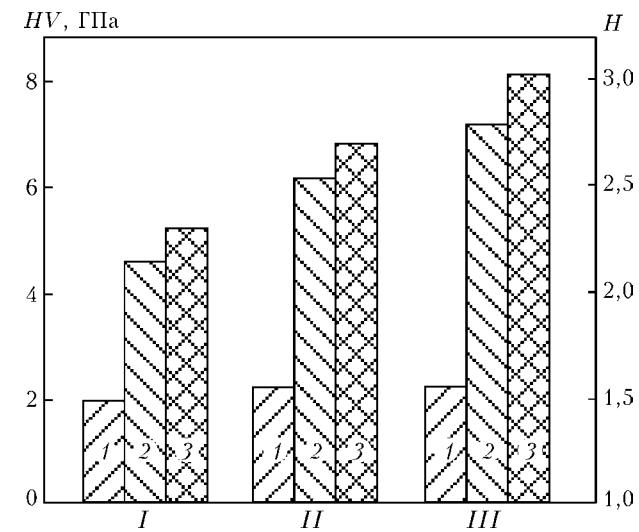


Рис. 1. Изменение микротвердости HV до (1) и после (2) деформации и степени упрочнения H (3) стали 110Г13Л: I — литая сталь; II, III — сталь после ЭШН с применением соответственно флюса АНФ-6 и разработанного

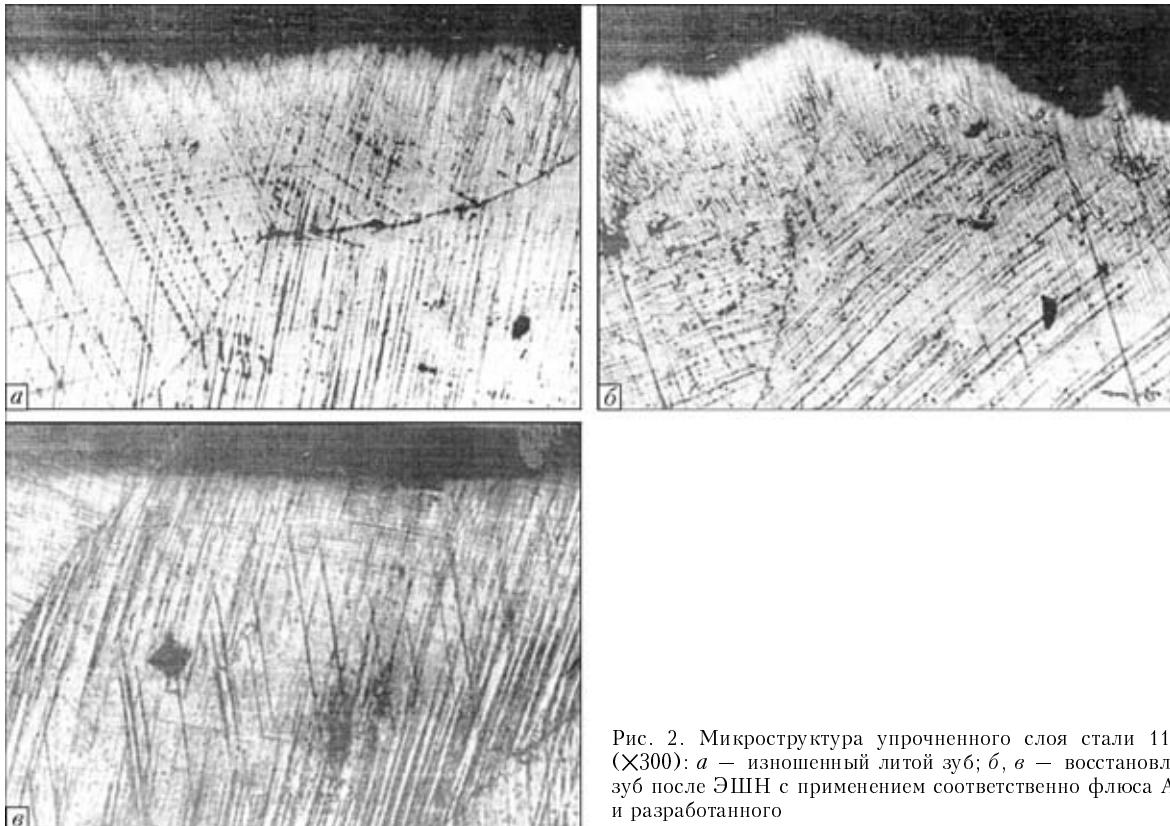


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя стали 110Г13Л ($\times 300$): *а* — изношенный литой зуб; *б*, *в* — восстановленный зуб после ЭШН с применением соответственно флюса АНФ-6 и разработанного

локаций, дефектов упаковки, двойников деформации), а также со значительным измельчением блоков мозаичной структуры. Кроме того, существенное снижение загрязненности стали карбидами и неметаллическими включениями при ЭШН способствует более интенсивной и глубокой деформации металла.

Результаты исследования деформационного упрочнения натурных зубьев достаточно хорошо коррелируют с данными лабораторных исследований, изложенными выше.

В связи с тем, что степень изнашивания стали 110Г13Л обратно пропорциональна ее твердости от наклена при ударно-динамическом воздействии, можно считать, что степень деформационного упрочнения является непосредственной характеристикой износстойкости, что и объясняет замеченное повышение работоспособности восстановленных с помощью ЭШН деталей горного оборудования, работающих в условиях интенсивных ударно-динамических нагрузок.

Electroslag surfacing of high-manganese steel 110G13L is shown to provide a substantial increase in susceptibility of the steel to strain hardening, in addition to restoration of geometry and recovery of performance of parts, which leads to increase in wear resistance of metal and extension of service life of parts.

1. Восстановление зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-8И электрошлилаковой наплавкой // К. А. Валиц, В. П. Стойко, А. Я. Шварцер и др. // Горн. журн. — 1981. — № 1. — С. 16–17.
2. Валиц К. А., Стойко В. П. Повышение долговечности зубьев ковшей карьерных экскаваторов // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. конф., г. Запорожье, 26–28 нояб. 1986. — Запорожье: Коммунар, 1986. — С. 280.
3. Валиц К. А., Шварцер А. Я., Корицкий Г. Г. Восстановление деталей из высокомарганцевой стали 110Г13Л электрошлилаковой наплавкой // Автомат. сварка. — 1988. — № 5. — С. 64–65.
4. Валиц К. А., Шварцер А. Я., Стойко В. П. Флюс для электрошлилаковой наплавки высокомарганцовистой стали // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 4. — С. 26–28.
5. Попомаренко В. П., Шварцер А. Я., Стойко В. П. Высокомарганцовистая сталь для электрошлилаковой наплавки // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1982. — № 10. — С. 57–60.
6. Богачев И. Н., Еголаев В. Ф. Структура и свойства железомарганцевых сплавов. — М.: Металлургия, 1973. — 296 с.
7. Григоркин В. И., Коротушенко Г. В. Свойства аустенитной высокомарганцовистой стали, легированной карбидообразующими элементами // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1966. — № 10. — С. 27–29.

Поступила в редакцию 11.03.2004

УДК 608.3:621.791

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРВЫХ СПОСОБОВ ПАЙКИ

А. М. ЖАДКЕВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена ретроспектива развития техники пайки при изготовлении ремесленниками древнего мира и средних веков бронзовых, золотых и серебряных изделий. Описана технология пайки сложных оловянных изделий. Отмечается, что источником нагрева были горны с воздушным дутьем через трубку, а в состав флюсов входили металлические порошки металлов, карбонаты и нитраты. Состав припоев подбирался из условия минимальной температуры эвтектического превращения и одинакового цвета и блеска с паяемым металлом.

Ключевые слова: история техники, технология пайки, источники нагрева, флюсы, припои, паяные изделия

В настоящее время пайка является высокоразвитой технологией изготовления изделий различного назначения из разнообразных металлов и сплавов. Она находит применение в различных областях для соединения как мельчайших деталей, например, электронных приборов, так и узлов крупногабаритной техники в ракетостроении, энергетике и других отраслях.

В последние десятилетия интенсивно развивались научные основы пайки, значительно расширился арсенал источников нагрева. Составы припоев разрабатываются с учетом многокомпонентных диаграмм состояния сплавов. Современные достижения и возможности пайки освещаются в многочисленных публикациях в периодических изданиях, а также в монографиях и справочниках [1].

Однако, чтобы полнее и всесторонне раскрыть значение техники в истории общества, необходимо проанализировать истоки технологии, ее историческое развитие [2].

В большинстве публикаций по истории металлообработки описана технология изготовления известных по археологическим материалам паяных изделий. При этом ряд авторов В. А. Колчин, Б. А. Рыбаков, С. П. Недопака, Г. А. Вознесенская и другие [3–5] опираются на результаты металлографических исследований. Вместе с тем до настоящего времени недостаточно исследованы техника нагрева, возможности изготовления припоев и ряд других особенностей пайки сложных металлических изделий.

Целью настоящей работы является анализ технологических возможностей пайки в древнем мире с учетом ее современного состояния.

Пайка представляет собой процесс соединения металлических деталей, находящихся в твердом состоянии, посредством расплавленного присадочного металла — припоя [6]. Исходя из этого оп-

ределения, обязательными условиями пайки являются: 1) источник нагрева до температуры плавления припоя; 2) припой из сплава металлов, температура ликвидуса и солидуса которого должна быть ниже температуры плавления металлов паяемых деталей.

Пайку как одну из технологий соединения при производстве изделий из металлов историки относят к одной из древнейших [3]. Она возникла одновременно с началом изготовления изделий из искусственных металлических материалов — бронзовых, а затем железных и стальных орудий труда, оружия и предметов быта. Важнейшей предпосылкой появления пайки было овладение техникой нагрева, создание печей, горнов и других устройств для сжигания органического топлива с естественным или искусственным дутьем. На протяжении тысячелетий и вплоть до настоящего времени прогресс в области техники и технологии пайки во многом определяется способом подачи тепла в зону соединения.

Большинство археологов считают, что первыми припоями были олово и бронза из-за сравнительно низкой температуры плавления, что позволяло расплавлять их на открытом огне костра с помощью известных тогда способов дутья [3]. Действительно, археологические материалы подтверждают, что пайка появилась на рубеже медного и бронзового веков, т. е. в III–II тысячелетии до н. э. В этот период технология выплавки бронзы развивалась в местах, где, наряду с месторождениями самородной меди, древнейшие металлурги владели и технологией искусственной выплавки меди, и в то же время разрабатывались залежи оловосодержащих минералов. Часто бронзы получались при смешивании различных руд, причем в рудах, кроме соединений меди или олова, обычно содержались и другие сопутствующие металлы. Так, было замечено, что в зависимости от вида руды изменяются литейные качества сплава (лучшие отливки получаются из мышьяковистых и мышьяковисто-сурьмянистых бронз).

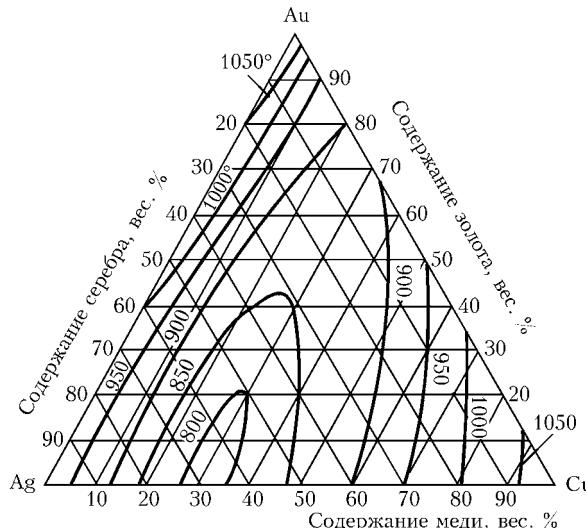


Рис. 1. Диаграмма состояния золото–серебро–медь [9]

К древнейшим очагам выплавки бронзы относят Шумернию, Вавилон, регионы Китая и Таиланда. Следует отметить, что такие государства, как Египет и Греция, где не было месторождений оловянных руд, вынуждены были завозить эти руды или сам металл и бронзу из Центральной Африки и Шумерии (Египет), стран Среднего Востока (Греция). Финикийцы добрались до Британских островов, где и открыли месторождения оловянной руды — кассiterита. Таким образом, поиск компонентов бронзы являлся причиной захвата территорий, стимулом путешествий, торговли. Спрос на бронзовые украшения, оружие, предметы быта стимулировал развитие горного дела, металлургии, различных технологий обработки металлов [7].

Исследования изделий IV–III тысячелетий до н. э., найденных на территории государств Ближнего Востока (современный Иран, Сирия, Ирак, Турция), свидетельствуют о высоком уровне металлообработки. Большинство изделий из меди и бронзы отлиты в глиняные вертикальные формы (лезвия, шилья и пр.). Для упрочнения иногда применялась последующая проковка, часто с промежуточным отжигом [8]. На рубеже IV–III тысячелетий до н. э. в Шумерии существовала узкая специализация в производстве изделий из металла, что способствовало усовершенствованию технологий. Так, металлографические исследования украшений свидетельствуют о высоком качестве не только мелких отливок, но и владении техникой

филиграции, зернения, чеканки, а также применения пайки [8].

При литье, особенно пайке бронзой, состоящей из ряда легирующих элементов, требовалось обращать особое внимание на температуру нагрева. Из диаграммы состояния, например, трехкомпонентного сплава Au–Cu–Ag видно, что граница солидуса-ликвидуса может изменяться в пределах от 800 до 1050 °C (рис. 1). На фресках в гробнице египетского фараона Мереруба (2315–2190 гг. до н. э.) представлен процесс пайки (с контролем состава), при котором огонь в плавильном горне раздувают через трубы несколько человек (рис. 2). Такая техника нагрева в отличие от костра позволяла оперативно регулировать температуру.

Следует отметить, что историк техники М. Беккерт, кроме припоея из олова, оловянно-свинцовых и бронзовых, допускает применение в Египте для пайки меди серебряной проволоки [10], с чем можно согласиться.

Вполне развитой технологией производства изделий из бронзы уже в VI в. до н. э. владели сарматские племена Поволжья и Южного Приуралья. В частности, для изготовления зеркал они использовали бронзу, состоящую из ряда легирующих элементов: меди, свинца, олова, никеля, соотношение которых обеспечивало хорошие лигатные свойства и высокие отражательные способности [11].

Если до начала освоения железоделательного производства бронза оставалась основным металлом для производства оружия и орудий труда, то такие драгоценные металлы, как золото и серебро, в основном использовали для украшений. С самородным золотом человек познакомился еще в эпоху неолита и с того времени начал накапливать опыт, который в последующем пригодился при обработке других металлов. Разнообразные изделия IV–III-тысячелетии до н. э., выполненные шумерами и египтянами, свидетельствуют о достаточно высокой технике обработки золота.

Среди греческих городов-государств северного побережья Черного моря в VII–V вв. до н. э. выделяется Пантикопей — крупный ремесленный центр, в котором была особенно развита обработка цветных металлов. Античные образцы изделий бытового назначения и искусства, найденные при раскопках, свидетельствуют о том, что греческие тореваты (мастера художественной обработки ме-



Рис. 2. Изображение процесса пайки на фресках в гробнице фараона Мереруба

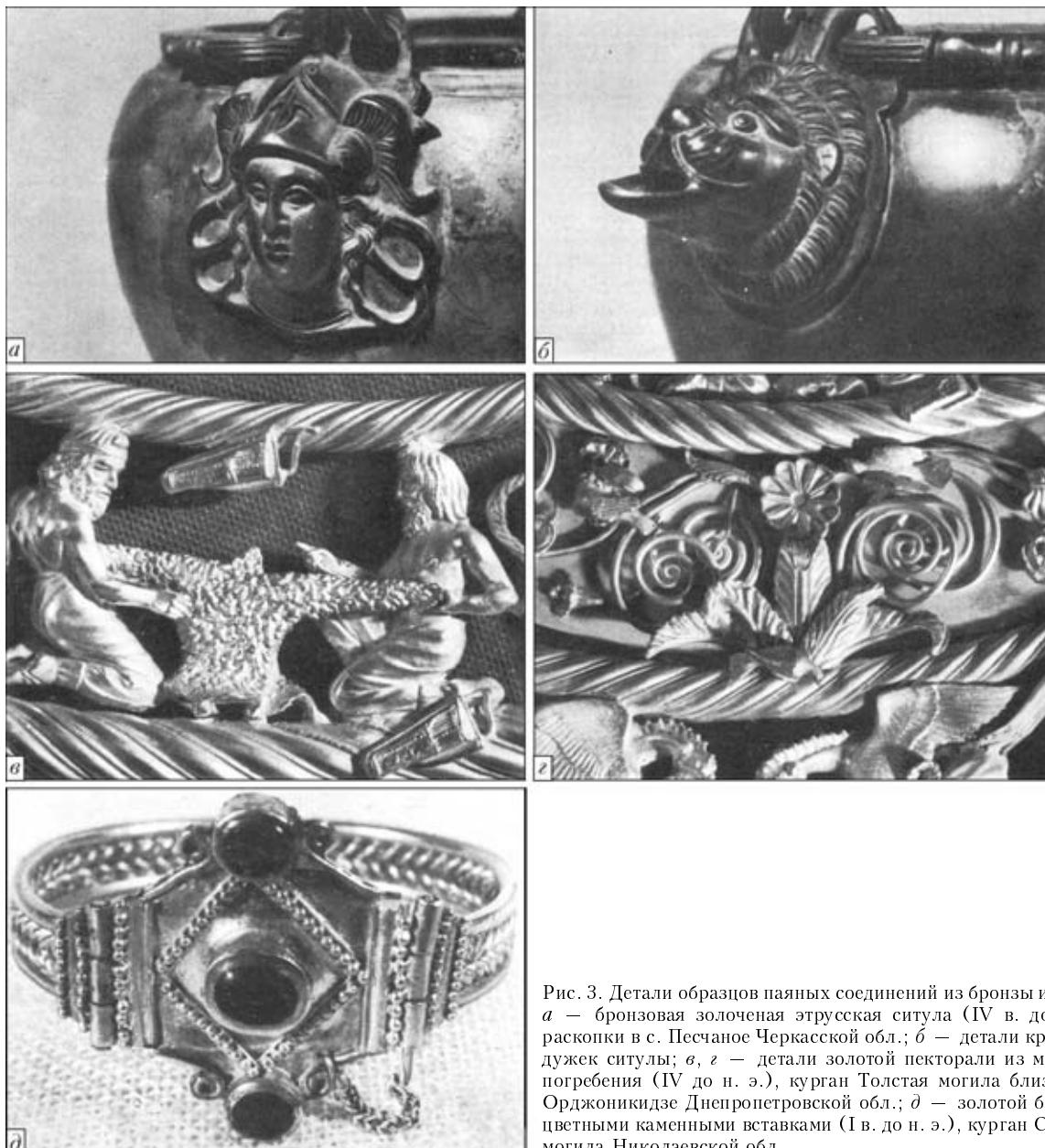


Рис. 3. Детали образцов паяных соединений из бронзы и золота: *а* — бронзовая золоченая этрусская ситула (IV в. до н. э.), раскопки в с. Песчаное Черкасской обл.; *б* — детали крепления дужек ситулы; *в, г* — детали золотой пекторали из мужского погребения (IV до н. э.), курган Толстая могила близ города Орджоникидзе Днепропетровской обл.; *д* — золотой браслет с цветными каменными вставками (I в. до н. э.), курган Соколова могила Николаевской обл.

таллов) владели разнообразной техникой литья, штамповки, ковки, клепки и пайки. Так, в Музее исторических драгоценностей Украины хранится скифский короткий меч-акинак в золотых ножнах, обнаруженный в кургане близ хутора Шумейко Сумской обл. Орнаменты верхней части рукоятки и наконечник ножен выполнены в виде углубленных треугольников, заполненных зернистым зерном — мелкими золотыми шариками, припаянными к золотой основе.

В долине реки Супой у села Песчаное Черкасской области были найдены 15 бронзовых греческих ваз VI—IV вв. до н. э. Швы стенок всех ваз кованые, а литые ручки, горельефы и аппликации присоединены пайкой и клепкой, причем некоторые из деталей позолочены (рис. 3, *а, б*) [12].

В музеях Украины хранятся сотни предметов быта, ювелирных изделий и образцов оружия, украшенные в древнегреческом и скифском стиле с помощью пайки, а также декорированные мель-

чайшей зернистым зерном. Особо отличается золотая пектораль — нагрудное украшение, найденное в 1971 г. в скифском кургане вблизи Орджоникидзе Днепропетровской области (рис. 3, *в, г*). Это уникальное изделие состоит из трех ярусов: между ажурными верхним и нижним ярусами припаяны литые фигуры людей, реальных и мифических животных [12, 13].

По внешнему виду паяные соединения не отличаются от цельнолитых деталей из золота или его сплавов. Особенно сложна техника пайки зерни. На поверхности, площадь которой на некоторых изделиях достигает нескольких квадратных сантиметров, размещались припаянные шарики диаметром 0,1...1 мм (рис. 3, *д*). При этом разница температур плавления золота и припоев (сплавы золото-медь и золото-серебро) незначительна (рис. 4, 5), поэтому ювелирам приходилось точно выдерживать режим нагрева в пределах одного-двух десятков градусов. Подобная техника пайки



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

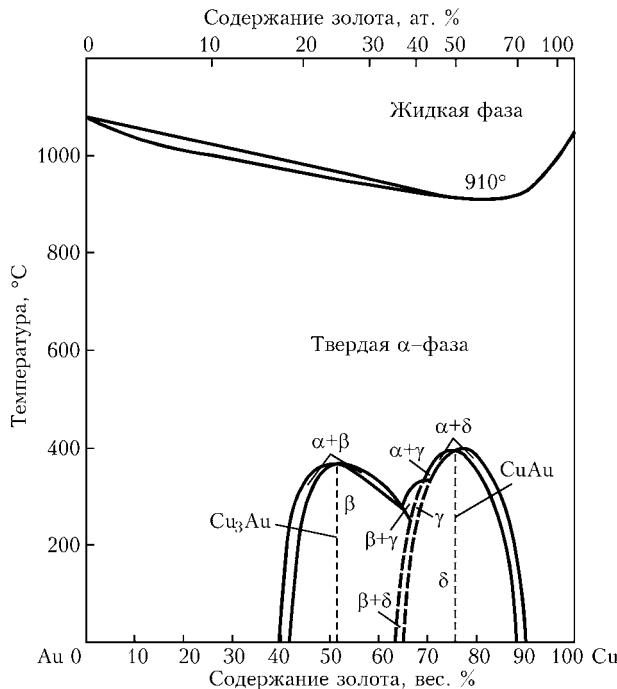


Рис. 4. Диаграмма состояния сплава золото–медь

золата описана в 60-х гг. н. э. в трудах римского ученого, писателя и государственного деятеля Гая Плиния Старшего «История природы» (37 книг), который отмечает большие трудности при соединении деталей украшений и других сложных изделий [14].

Основным способом получения монолитных соединений изделий из железа являлась кузнецкая сварка и сварка заливкой [15]. При пайке применяли припои из бронзы и латуни, поскольку

разница температур достаточно большая, то соблюдать режим нагрева было менее сложно, чем при пайке золота, серебра и бронзы.

Одним из древнейших очагов металлургии железа считается Закавказье. Археологи относят появление железных изделий на территории современных Дагестана, Азербайджана, Армении и Грузии ко II–I тысячелетию до н. э. В этот период местные специалисты сделали шаг в развитии металлодобывающих и металлообрабатывающих технологий. Здесь значительно ускорился процесс замены бронзового оружия и орудий труда, начавшийся еще в VII в. до н. э. [16].

Находки из курганов Южного Приднепровья свидетельствуют о высокой технике обработки железа и бронзы киммерийскими племенами VIII–VII вв. до н. э. Интересны, например, кинжалы, состоящие из стального клинка и бронзовой рукоятки [17].

Техникой изготовления изделий из железа и бронзы отлично владели мастера Киева и Новгорода. При раскопках в слоях X–XIV вв. найдены сотни предметов быта, ювелирные украшения, оружие [14]. Из цветных металлов изготавливали перстни, бубенчики, браслеты, крестики, детали фибулы и ремней. При микроструктурных анализах этих деталей обнаружено использование пайки (рис. 6). Так, в каталоге находок на месте городища на южной окраине Новгородской земли под № 150 зарегистрированы: «Бубенчики бронзовые из двух спаянных полушарий с линейной прорезью и поперечным линейным швом, который выступает примерно посередине их высоты. Использовались как привески, детали костюма и даже как пуговицы» [18].

Несколько отличная технология применялась при пайке оловянных изделий. На протяжении многих веков олово являлось одним из основных материалов для изготовления литых пуговиц, посуды, скульптур,

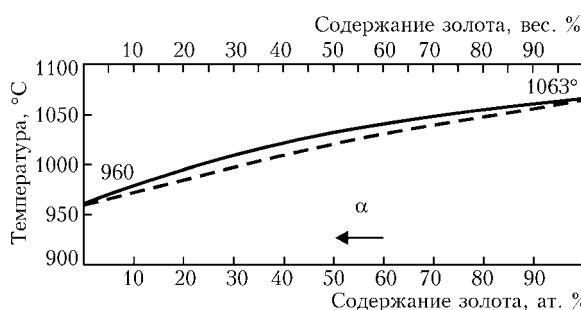


Рис. 5. Зависимость температуры плавления сплава золото–серебро от соотношения компонентов

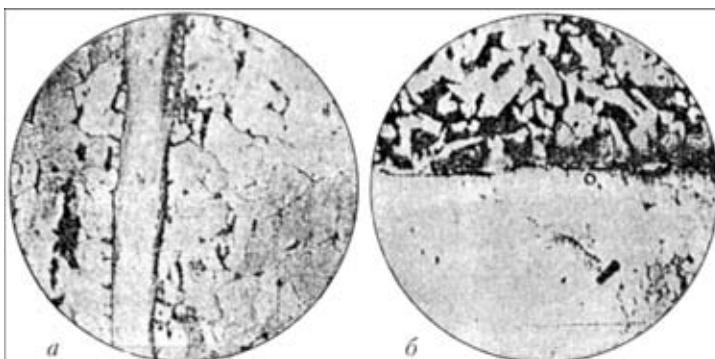


Рис. 6. Микроструктура ювелирных паянных изделий [3]: а – $\times 100$; б – $\times 50$



Рис. 7. Грелка (?) в форме книги с гравированным декором. Мастер Рудольф Майс, Славков, З четьв. XVII в. [19]



Рис. 8. Блюдо рукомойное «Temperantia» с кувшином. Мастер Франсуа Брио, Монбельяр, Лотарингия, ок. 1585–1590 гг. [19]



Рис. 9. Звонок, украшенный кованым орнаментом из цветов и побегов (Богемия, XVII в.), [19]

деталей приборов и игрушек. Поскольку чистое олово плохо заполняет форму, то для улучшения жидкотекучести к нему добавляют свинец (для посуды не более 3...4 %) и отливку ведут в горячие латунные, песочные и другие формы.

Поражают сложностью формы скульптуры, предметы быта, посуда, хранящиеся в Эрмитаже и других музеях мира. Многие из них изготовлены из нескольких спаянных частей (рис. 7–9) [19]. В конце XIX в. применялась следующая технология пайки оловянных изделий: «спайку производят не более легкоплавким припоем, а тем же самым сплавом, из которого изготовлена сама вещь, потому что иначе шов скоро потемнеет и станет виден. Для спайки пользуются обыкновенным медным паяльником и салом вместо паяльной воды, но при работе спаиваемые края тоже плавятся; поэтому, составив части, оловянщик аккуратно подкладывал под спаиваемое место толстый войлок, выдерживаящий температуру плавления олова, чтобы расплавленный металл не вытек, а затвердел в прежней форме» [20].

Если особенности технологии нагрева при первых способах пайки можно установить на основе металлографических исследований археологических образцов и оценить с позиций современного металловедения, то о технике удаления оксидных пленок, точнее, применении флюсов, можно судить только по редким сохранившимся описаниям [14].

Одним из самых полных средневековых трактатов о технологиях металлов является сочинение монаха Свято-Галленского монастыря Феофила «Diversarum artium schedula» (предположительная дата написания IX–XI вв.). Сохранившийся в библиотеке Кембриджского университета рукописный экземпляр относится к XIII в., он переиздан в Париже в 1843 г. под названием «Théophile prêtre et mine, Essais sur divers art». Часть трактата пос-

вящена литью и пайке металлов. Преподобный Феофил рекомендует готовить флюс в виде пасты (похожей на мыло) из щелока и свежего сала хорошего поросенка, в которую добавить соль и металлическую медь. Проверка на современном уровне технологии, разработанной в стенах Галленского монастыря, показала, что качество соединений может соответствовать современным требованиям ювелирной промышленности. Паста из сала поросенка и щелока — неплохой флюс, который разлагает при высоких температурах оксидные пленки на поверхности меди. Очищенная медь легко сплавляется с золотом, а образовавшиеся загрязнения уходят в шлак.

В трудах Феофила указаны и другие способы и составы приготовления флюсов. Для пайки золота необходим «хризолит зеленого оттенка, который предпочтительнее других солей меди. Хризолит смешивают с кипрской медянкой и мочой безбородого мальчика. Добавляют селитру, и все растирают в ступке в порошок. Полученную смесь называют Santerno (бура). При пайке золота припоем с примесью одной семнадцатой части серебра такая смесь (флюс) обеспечивает блестящий шов. С другой стороны, золото, которое содержит медаль, паять трудно, шов получается тусклым». П. Робертс, анализируя флюс, который применяли золотых дел мастера в Древнем Риме, расшифровывает состав: хризолитгидрат медного силиката ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); медянка — основной карбонат меди ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{CuO}$); урина — соли аммония; сода (Ca_2CO_3) [21].

Следует отметить, что о применении сала, соды, древесной золы упоминается и в других, более поздних трактатах. Кроме того, Феофил для пайки серебра предлагает взять две части чистого серебра и одну (третью) часть меди, перетереть в ступке, затем добавить «винный камень, содрав его от

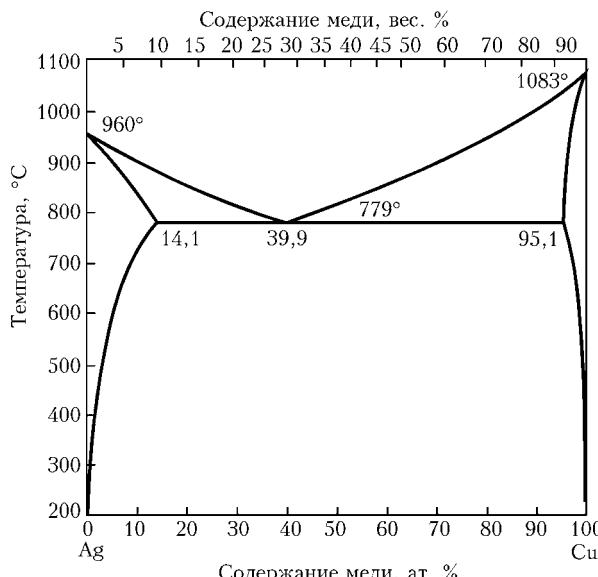


Рис. 10. Диаграмма состояния сплава серебро–медь

стенок сосудов, где долго хранилось хорошее красное вино». В эту смесь добавить соль (хлористый натрий) и нагревать на огне до тех пор, пока все не испарится, золу снова растереть. Для пайки используют водный раствор этой смеси.

Оценивая эту технологию, интересно отметить, что при таком соотношении серебра и меди образуется сплав с минимальной точкой плавления 779...800 °C (рис. 10), а из винного камня и поваренной соли — довольно активный флюс на основе едкого калия. В целом при пайке использовали порошки, содержащие припой и флюс в оптимальном соотношении.

В течение последующих веков пайка оставалась наиболее распространенной технологией получения неразъемных соединений изделий из цветных металлов. Материалы и техника пайки совершенствовались по мере развития химии и улучшения источников нагрева. Однако основу флюсов по-прежнему составляли поташ и вещества на основе карбонатов.

Интенсивность нагрева увеличилась за счет дутья с помощью мехов и насосов. Только в XIX в. производительность пайки повысилась благодаря применению высококалорийных горючих газов и электронагрева.

Выводы

1. Первые способы пайки были разработаны в период изготовления литых изделий из самородных металлов, а затем из бронзы и железа. Нагрев

осуществлялся в горнах при сгорании твердого органического топлива и вдувании воздуха.

2. В качестве флюсов использовались минералы и органические вещества, которые образуют при нагреве соединения, очищающие поверхность от загрязнений и оксидных пленок.

3. В древнем мире были определены составы припоев, соотношение компонентов в которых соответствовало низкоплавким эвтектикам. Компоненты припоев часто вводились в состав флюсов в порошкообразном состоянии.

1. Справочник по пайке / Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 407 с.
2. Техника в ее историческом развитии / Под ред. С. В. Шухардина, Н. К. Ламана, А. С. Федорова. — М.: Наука, 1979. — 413 с.
3. Колчин Б. А. Проблемы изучения технологии древнейших производств // Очерки технологии древнейших производств. — М.: Наука, 1975. — С. 5-13.
4. Рыбаков Б. А. Ремесло Древней Руси. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 780 с.
5. Археология и естественные науки: Сборник. — М.: Наука, 1967. — 650 с.
6. Хренов К. К. Резка и пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1970. — 408 с.
7. История древнего мира / Под ред. И. М. Дьякова, В. Д. Неровной, И. С. Свенцицкого. — М.: Наука, 1989. — Кн. 2: Рассвет древних обществ / Под ред. И. С. Свенцицкого. — 572 с.
8. Maryon H. Metal working in the ancient world // Amer. J. Archeol. — 1949. — № 2. — P. 93-125.
9. Бочвар А. А. Металловедение. — М.; Л.: Металлургиздат, 1945. — 720 с.
10. Беккерт М. Мир металла. — М.: Мир, 1980. — 152 с.
11. Мошкова М. Г., Рындина Н. В. Сарматские зеркала Поволжья и Приуралья (химико-технологическое исследование) // Очерки технологии древнейших производств. — М.: Наука, 1975. — С. 117-133.
12. Музей исторических драгоценностей УССР. — Киев: Мистецтво, 1984. — 191 с.
13. Тисячна Н. Золота еволюція України // День. — 2004. — № 94. — С. 8.
14. Maryon H. The technical methods of the Irish smith in the bronze and early iron ages // Proc. Royal Irish Acad. — 1938. — № 3. — P. 181-225.
15. Корниенко А. Н. Возникновение первых способов сварки // Автомат. сварка. — 1996. — № 1. — С. 53-57.
16. Старожитності Кременчука: Археологічні пам'ятки території та околиць міста / О. Б. Супруненко, І. М. Кулакова, К. М. Мироненко та ін. — Полтава: ВЦ Археологія, 2004. — 160 с.
17. Гзелишвили И. А. Железоплавильное дело в Древней Грузии. — Тбилиси: Сакартвело, 1964. — 295 с.
18. Абдулин Д. А. Археология СССР. — М.: Наука, 1967. — 650 с.
19. Большая иллюстрированная энциклопедия древностей / Д. А. Гейдова, Я. Дудик, Л. Кибалова и др. — Прага: Ария, 1982. — 496 с.
20. Лермонтов В. В. Оловянщик (Энциклопедический словарь) / Под общ. ред. К. К. Арсеньева и Ф. Ф. Петрушевского. — СПб: Типо-Литография М. А. Эфрона, 1898. — Т. 21. — С. 898.
21. Roberts P. M. Early evolution of brazing. Pt. 2 // Welding and Metal Fabric. — 1974. — № 12. — P. 412-416.

Retrospective development of brazing technique in manufacturing of bronze, gold and silver items by the ancient and medieval craftsmen is considered. Technology of brazing complex tin items is described. It is noted that the heat source was a furnace with air blowing through a tube, and the flux composition included metal powders, carbonates and nitrates. Braze alloy composition was selected from the condition of minimum temperature of the eutectic transformation and the same colour and luster as that of the brazed metal.

Поступила в редакцию 06.09.2004



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

С. Н. ПОПОВ, канд. техн. наук, **Д. А. АНТОНЮК**, инж. (Запорож. нац. техн. ун-т)

Представлены основные методы организации технологии дистанционного обучения инженерных кадров в сварочном производстве. Приведены статистические данные и показаны перспективы внедрения таких технологий на кафедре оборудования и технологии сварочного производства Запорожского национального технического университета.

Ключевые слова: дистанционное образование, бакалавр, специалист, магистр, информационно-образовательный ресурс, киберкоммуникативное пространство, обучение персонала, инженерные кадры, метод кейс-технологии, ТВ-технология, сетевая технология

Широкое применение информационных и коммуникационных технологий является характерной особенностью мирового развития последних десятилетий. Современный научно-технический прогресс, информатизация промышленности, сферы бизнеса и общества в целом выдвигают требования к подготовке качественно новых инженерных кадров с высоким уровнем всесторонних знаний, в полной мере владеющих новейшими достижениями вычислительной техники.

Уже сегодня ощущается возрастающая потребность в высококвалифицированных специалистах, занятых в сварочном производстве, воспринимающих прикладные программы (MS Office, Photoshop, Corel Draw, MathCAD, MathLab, Mathematica, AutoCAD, PLAXIS, ANSYS и др.) и владеющих ими. Это прежде всего связано с изменением менеджмента технологического производства сварных конструкций, их новыми возможностями в отрасли инженеринга, особенно 3D графического дизайна сварных блочных элементов, что немаловажно при динамичном анализе и перестройке маркетинговых схем удовлетворения запросов покупателей (заказчиков).

Решение данной проблемы возможно при коренном пересмотре системы образования, обеспечении идентичности инструментальных средств, технологий, информационной среды инженера, менеджера и маркетолога, обеспечивающих процесс сварочного производства и реализацию изготавляемой продукции. Для этого необходимо использовать информационные технологии при преподавании курсов как общепрофессиональных, так и специальных дисциплин.

Использование информационных систем при подготовке специалистов в области сварки и износостойких технологий требует создания информационно-образовательных ресурсов (ИОР), объединяющих лучший кадровый потенциал, новейшие учебно-методические разработки, электронные библиотеки, новые методы получения образования на базе дистанционного обучения [1].

ИОР представляет собой системно организованную совокупность средств создания, актуализации и передачи данных, интеллектуальных и информационных ресурсов, протоколов взаимодействия, аппаратно-программного и организационно-методического обеспечения, целенаправленно ориентированных на удовлетворение актуальных образовательных потребностей населения различных регионов.

Применение информационных технологий позволяет открыть новые возможности для системы обучения инженеров, бакалавров, специалистов в областях, связанных со сварочным производством: наглядное, динамичное представление сварочных и наплавочных процессов с использованием видеоизображений, звука; обеспечение свободы выбора методики, стиля и средств обучения, что облегчит самоосознанное раскрытие потенциальных перспектив получаемых знаний; создание научно-методически обоснованной системы базового образования (математика, физика, химия, термоди-

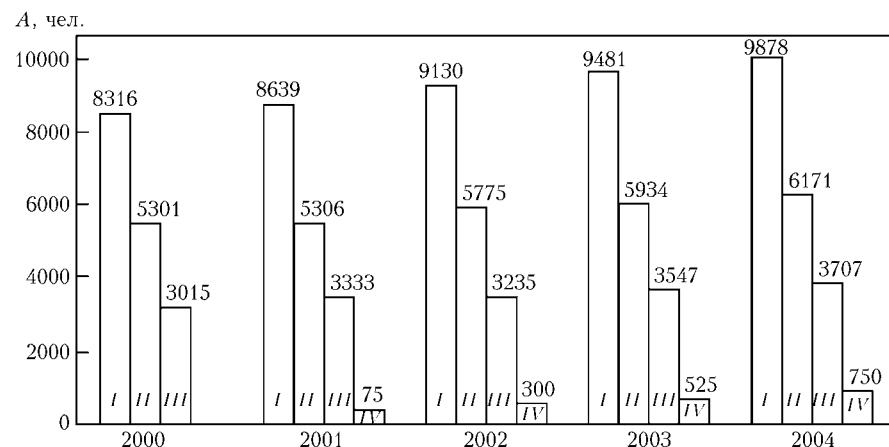


Рис. 1. Динамика роста численности студентов (A) ЗНТУ: I – всего, II – дневная, III – заочная, IV – дистанционная форма обучения

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

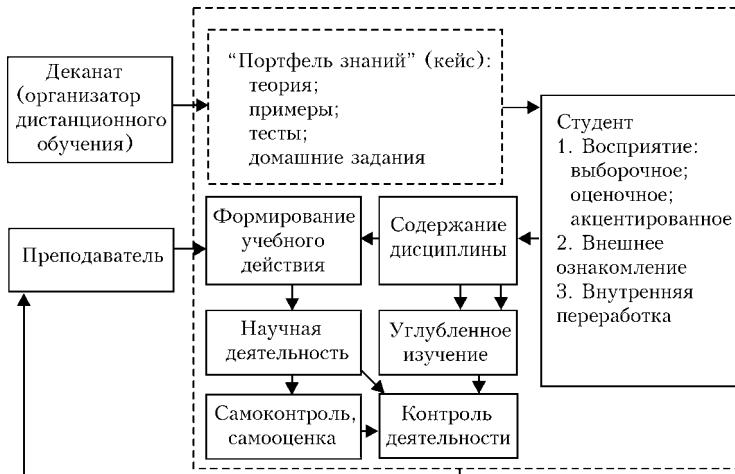


Рис. 2. Общая схема метода кейс-технологии

номика, сопротивление материалов) на основе новых синергетических принципов развития информационных технологий. Использование таких технологий дает возможность обеспечивать непрерывность и последовательность компьютерного обучения на всех уровнях образования с созданием компьютерного обеспечения всех дисциплин учебного процесса.

Предлагаемая система образовательных технологий позволяет открыть возможности для обновления содержания обучения и методов преподавания; расширить доступ к общему и профессиональному образованию; преобразовать методику получения и систематизации баз знаний; изменить роль преподавателей в учебном процессе [2, 3].

Анализ численности учащихся Запорожского национального технического университета (ЗНТУ) (рис. 1) показывает, что при сохранении динамики роста численности студентов дневной и заочной формы обучения их количество в ближайшее время может составить около 10 тыс. человек. При этом непрерывно возрастает количество студентов, использующих в учебном процессе технологии дистанционного обучения.

На протяжении последних лет в системах образования различных стран проводятся работы по внедрению в практику принципов и технологий дистанционного и открытого обучения [2–5]. На

наш взгляд, для подготовки инженерно-технических специалистов в области сварки и родственных технологий необходимо создание комплексного метода обучения, который основывается на усовершенствовании известных приемов в единой киберкоммуникативной среде информационного сетевого ресурса [1].

Так, для простых, необходимых для получения высшего образования, познательно-информационных курсов, таких, как история Украины, культура, основы религии, основы обработки материалов, физико-химические и металлургические основы производства металлов, основы охраны труда, экология, введение в специальность, можно применить метод кейс-технологии (рис. 2), который заключается

в составлении и комплектации специального набора учебно-методических материалов [6] с последующей передачей (с помощью почты, E-mail) обучаемому для самостоятельного изучения и последующего периодического обращения за разъяснением к консультанту [3].

Использование данного метода позволяет установить преподавателю, насколько разобрался студент в данной проблеме. В то же время одностороннее использование только таких форм образования обезличивает живое общение с педагогом. Отсутствие диалога в реальном времени снижает эффективность и скорость усвоения материала. Это связано с потерей индивидуального личностного воздействия преподавателя как сформировавшейся личности, как «живого носителя знаний».

Наличие обоюдного диалога в обучении в определенной мере может обеспечить применение так называемой ТВ-технологии или видеоконференций (рис. 3), которые базируются на использовании телевизионных лекций с консультациями у преподавателей-консультантов по сети киберкоммуникативного ресурса с использованием телефонных, радио или других каналов связи.

Такие технологии необходимо применять на более старших (третьих–пятых) курсах, при курсовом и дипломном проектировании для таких дисциплин, как теоретическая механика, детали машин и основы конструирования, прикладная механика, теория сварочных процессов, сварочные источники питания, триботехника и надежность машин, сварка плавлением, сварка давлением, проектирование и производство сварных конструкций, контроль качества сварки, технологическая оснастка и другие предметы. Стремительное развитие средств тe-



Рис. 3. Классификация видеоконференций

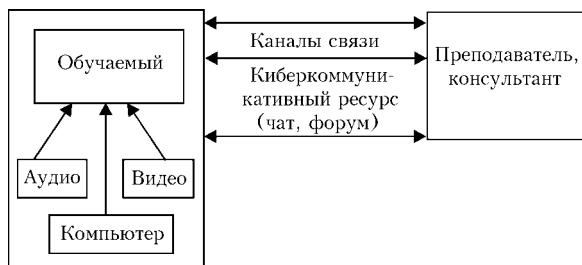


Рис. 4. Схема организации ТВ-технологии



Рис. 5. Принцип организации сетевой технологии обучения

лекоммуникации позволило резко сократить затраты на использование необходимого оборудования. Так, сегодня стоимость комплекта оборудования для проведения видеоконференций составляет примерно 100 долл. США за камеру, а специальное программное обеспечение можно получить в сети Интернет в виде бонуса [5].

Есть и другие новые технологии в передаче изображения, которые активно используются для дистанционного обучения. Например, цифровое телевидение — стандарт ATCS [7], уже сертифицированный Американской федеральной комиссией по телекоммуникациям. В конце 1998 г. в Сиэтле (США) началась трансляция экспериментальных передач в этом формате.

Однако настоящий прорыв в дистанционном обучении может обеспечить новая киберкоммуникативная webTV-технология (рис. 4), позволяющая с помощью декодера принимать на ваш домашний телевизор учебные программы через Интернет [4]. Применение такого метода обучения является наиболее актуальным и прогрессивным, особенно при изучении инженерных специальностей в области сварки, наплавки, триботехнологий нанесения специальных покрытий, создании биметаллических конструкций, поскольку позволяет наглядно оценивать процессы, протекающие при воздействии источника теплового излучения или контакта абразивных частиц с поверхностным слоем.

Киберкоммуникативная сетевая технология основана на использовании сети Интернет для организации учебного процесса на основе виртуального web методического обеспечения и интерактивного континуума между преподавателем и студентом (рис. 5).

Сетевой web-метод дистанционного образования активно стимулирует развитие систем информационного обеспечения учебного процесса — се-

тевых электронных библиотек, web-курсов [6] и других информационных ресурсов. Это связано с тем, что сегодня web-информация является главным вопросом в сфере сварки, износостойкости и смежных направлений.

Анализ сетевых ресурсов в Интернет показал, что количество сайтов, посвященных решению проблем трибологии, изнашиванию сталей и сплавов, свариваемости и материаловедению, составляет менее 3 % всей численности web-предложений.

Таким образом, новейшие методы организации учебного процесса по специальностям, связанным со сварочным производством, трибоматериаловедением и др., открывают широчайшие возможности для повышения уровня учебно-методического оснащения вуза, расширения лабораторной и производственной базы учебного процесса, привлечения новых групп населения для получения высшего технического образования (бакалавр, специалист, магистр), развития традиционных и создания новых форм получения инженерного образования.

Однако следует учитывать, что разработка и внедрение предложенных технологий возможна лишь при значительных материальных и интеллектуальных затратах. В связи с достаточным обес-

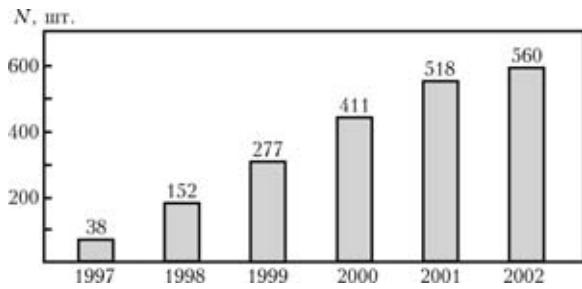


Рис. 6. Динамика численности персональных компьютеров N в ЗНТУ

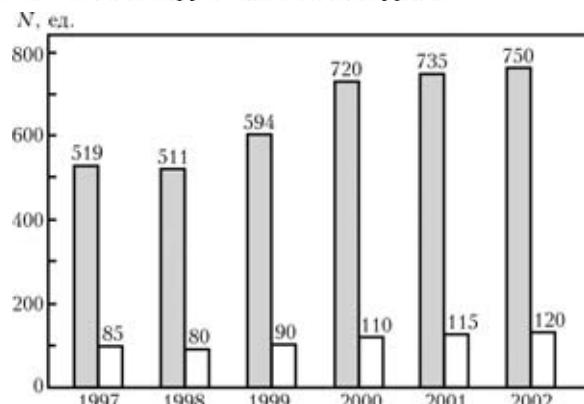


Рис. 7. Компьютеризация учебного процесса в ЗНТУ: ■ — количество дисплейных мест; □ — количество часов на одного студента в год; N — количество компьютеров

печением компьютерами (рис. 6) и дисплейными местами (рис. 7) студентов ЗНТУ, внедрение таких технологий в учебный процесс реально уже в ближайшее время.

Авторами проведены статистические исследования численности компьютеров в ЗНТУ с использованием программы математического анализа. Прогноз показывает, что при сохранении достигнутых темпов роста количества учебных мест, оснащенных компьютерной техникой, парк компьютеров к 2013 г. составит около 1900 ед. Это говорит о том, что практически каждый студент будет иметь возможность использовать технологии и методики дистанционного обучения в учебном процессе.

На кафедре оборудования и технологии сварочного производства ЗНТУ с учетом мировых тенденций организации обучения [3–5] ведутся работы по созданию принципов и методических подходов открытого дистанционного обучения, что позволит с течением времени расширить уровень и улучшить качество подготовки кадров в области сварки и износостойких технологий.

Внедрение новых киберкоммуникативных технологий, по нашему мнению, необходимо осуществить в два этапа.

Первый этап включает формирование и реализацию учебных курсов (учебных пакетов), в которые входят учебники, пособия, интерактивный курс на лазерных дисках, тематическая литература из курса; разработку методического и программного обеспечения приема экзаменов и тестирующих программ; подготовку преподавателей для организации учебного процесса.

На втором этапе применяются on-line Интернет-технологии, мультимедийные программы для подготовки специалистов в сфере сварки и износостойкости.

Создание дистанционного курса связано с выполнением сложной, продолжительной методичес-

кой и организационной работы. На мировом рынке стоимость разработки одного такого курса составляет более 1 тыс. дол. США. Внедрение дистанционного обучения предусматривает использование соответствующего аппаратного обеспечения. Телекоммуникационные сети должны поддерживать достаточно высокую скорость передачи данных.

Расчеты показывают, что стоимость подготовки одного специалиста при исключении затрат на переход и проживание, а также снижение общей стоимости курсов уменьшается почти в пять раз.

Таким образом, применение предлагаемых технологий в комплексной системе позволяет значительно повысить качество и уровень инженерных кадров, занятых в сварочном производстве и смежных областях. По нашему мнению, наиболее рациональным и эффективным является использование системно интегрированных кейс-технологий, технологий видеоконференций и сетевых в едином киберкоммуникативном пространстве со специально подготовленным и обученным персоналом (руководство и служба деканата, техническая служба, преподаватели).

Можно заключить, что дистанционная форма обучения не является альтернативной, она дополняет традиционные. Она учитывает индивидуальный характер обучения, поскольку каждый студент получает дифференцированные знания, которые выбраны им с учетом мотивации и скорости обучения. Данная форма образования имеет особую мотивационную основу, не всегда связанную с приобретением знаний для дальнейшей реализации в профессиональной карьере, а, например, для удовлетворения личных потребностей. Дистанционная форма обучения имеет высокую динамику обновления знаний.

1. Попов С. Н., Антонюк Д. А. Основные аспекты создания информационно-образовательных систем технологии сварки и родственных направлений на основе киберкоммуникативного ресурса // Докл. Всерос. науч.-техн. конф. — М.: МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. — С. 338–342.
2. Hara N., Kling R. WP 00-01-31. Students' distress with a web-based distance education course // CSIWorking paper. — 2000. — 30 March.
3. Концепция российского портала открытого образования <http://www.opennet.ru>.
4. Farrel Gl. The development of virtual education: a global perspective // <http://www.col.org/virtualed/index.htm>: The Commonwealth of learning. — 1999.
5. Wheeler S. The traditional university is dead — long life the distributed university // 19th EUCEC European conf. «Death and Rebirth of University Education?» (Bergen, Norway., 4–6 May, 2000). — Bergen, 2000. — P. 66–67.
6. Попов С. Н., Антонюк Д. А. Методика построения мультимедийного курса «Триботехника и надежность машин» на основе дистанционного компьютерного обучения студентов // Открытое образование. — 2004. — № 1. — С. 13–21.
7. The American communication association // <http://www.americancomm.org>.

Presented are the main methods of organizing the technology of remote training of engineering personnel in welding fabrication. Statistical data are given and prospects are demonstrated for introduction of such technologies at the Chair of equipment and technology of welding fabrication of Zaporozhje National Technical University.

Поступила в редакцию 09.03.2004,
в окончательном варианте 05.05.2004



УДК 621.791.753

ПРИМЕНЕНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШВОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКЕ

Р. Н. РЫЖОВ, канд. техн. наук, **В. А. КОЖУХАРЬ,** студент (НТУУ «Киевский политехнический институт»),
С. Ю. МАКСИМОВ, канд. техн. наук, **Е. А. ПРИЛИПКО,** инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе анализа экспериментальных зависимостей механических свойств сварных швов от индукции управляемого магнитного поля осуществлена оптимизация режима внешних электромагнитных воздействий для условий мокрой подводной сварки.

Ключевые слова: подводная сварка, внешнее электромагнитное воздействие, механические свойства металла швов

К конструкциям, свариваемым под водой, предъявляются повышенные требования в части показателей прочностных характеристик швов. Это связано как со спецификой их эксплуатации, так и с техническими трудностями и дорогоизнаной ремонтных сварочных работ.

Процесс подводной сварки характеризуется значительно большими, чем на воздухе, скоростями охлаждения металла сварного соединения [1], что приводит к увеличению уровня внутренних напряжений. В сочетании с повышенным насыщением металла водородом это вызывает ухудшение прочностных характеристик металла швов и повышение опасности образования холодных трещин.

Устранение указанных негативных эффектов возможно путем применения технологических приемов, позволяющих воздействовать в процессе сварки на кристаллизацию швов. С учетом специфики мокрой подводной сварки наиболее часто используются металлургические меры воздействия, заключающиеся в корректировке состава шихты порошковых проволок.

Как следует из работы [2], при сварке на воздухе для эффективного управления процессами кристаллизации металла швов используют внешние электромагнитные воздействия (ЭМВ), при которых в объеме ванны в результате взаимодействия электрического поля сварочного тока с аксиальной составляющей управляющего магнитного поля создаются объемные пондеромоторные силы, позволяющие управлять гидродинамикой расплава. При этом в области фронта кристаллизации происходят периодические изменения температуры, положи-

тельно влияющие на формирование первичной структуры, вследствие чего значительно улучшаются механические свойства металла швов [3]. Проведенные ранее исследования показали, что применение ЭМВ при мокрой подводной сварке позволяет в 2,5 раза снизить количество растворенного в металле швов водорода [4].

Цель данной работы — количественная оценка влияния параметров режимов ЭМВ на структуру и механические свойства металла сварных швов.

Эксперименты проводили на глубинах до 1 м. Многопроходную сварку образцов из стали 17Г1С толщиной 20 мм с V-образной разделкой кромок осуществляли порошковой проволокой ППС-АН2 на следующем режиме: $I_{cb} = 180$ А (обратная полярность), $U_d = 36$ В, $v_{sw} = 9$ м/ч. Аксиальное управляющее магнитное поле (УМП) в зоне сварки генерировали с помощью цилиндрического электромагнита, размещенного coaxialno мундштуку. Индукцию в УМП регулировали с помощью блока управления Ф91 [5]. Механические свойства металла швов определяли путем растяжения в испытательной машине образцов типа МИ12. При этом фиксировали временное сопротивление σ_b , предел текучести σ_t , относительные удлинение δ и сужение ψ участка разрушения.

В условиях экспериментов незначительное улучшение прочностных свойств металла швов при увеличении индукции УМП до 10 мТл (рис. 1) связано с тем, что на данных режимах ЭМВ потоки расплава, сформированные в головной части ванны, не успевают переместиться на достаточное расстояние вдоль хвостовой части ванны. При этом в примыкающих к продольной оси центральных областях шва, из которых изготавливали образцы, процессы кристаллизации незначительно отличаются от исходных условий. При $B = 15$ мТл зафиксировано увеличение σ_b на 8,5% и σ_t на 10 %.

Дальнейшее увеличение индукции приводило к ухудшению исследуемых характеристик. Это связано как с избыточной гидродинамикой расплава ванны, так и с ухудшением процессов переноса электродного металла, что негативно сказывается на формировании шва и стабильности процесса сварки в целом.

Применение ЭМВ позволяет значительно повысить пластичность металла сварных швов. При увеличении индукции

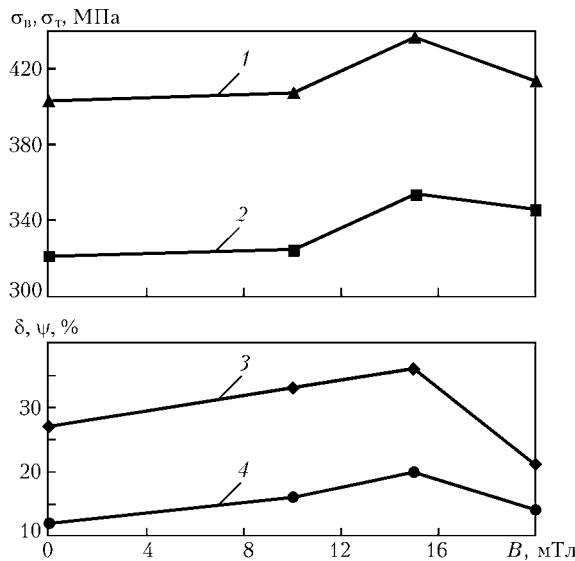


Рис. 1. Влияние индукции УМП на механические свойства швов: 1 — σ_b ; 2 — σ_t ; 3 — ψ ; 4 — δ

© Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь, С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко, 2004

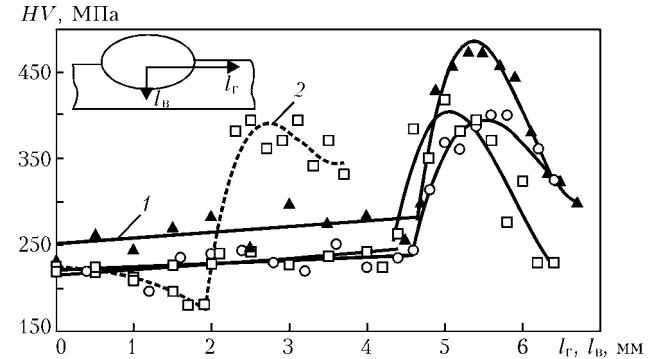


Рис. 2. Распределение твердости в поперечном сечении швов в горизонтальном l_r (1) и вертикальном l_B (2) направлениях: Δ — сварка по штатной технологии; \square , \circ — сварка с ЭМВ соответственно при $B = 10$ и 15 мТл



Рис. 3. Микроструктуры металла сварных швов: *a* — штатная технология; *b* — с ЭМВ при $B = 10$ мТл, $\times 200$

УМП до 15 мТл зафиксировано монотонное увеличение δ (на 66 %) и ψ (на 33 %). Достижение зависимостями, приведенными на рис. 1, экстремальных значений при одинаковых индукциях УМП свидетельствует о том, что изменения прочностных и пластичных свойств швов имеют одинаковую основу и связаны с соответствующими изменениями процессов кристаллизации. При этом в диапазоне $B = 0 \dots 15$ мТл равномерное возрастание и последующее резкое снижение пластичности может объясняться взаимосвязью данной механической характеристики с насыщенностью швов водородом и кислородом [4].

Изменение пластичности металла в горизонтальном и вертикальном от продольной оси наплавленных валиков направления оценивали по уровню микротвердости по Виккерсу HV при нагрузке 0,981 Н. Установлено, что в области продольной оси (на рис. 2 $l = 0$ мм) применение ЭМВ с $B = 10 \dots 15$ мТл позволяет снизить HV на 13 %. Во всех исследованных образцах при удалении от продольной оси в сторону линии сплавления в горизонтальной плоскости зафиксировано незначительное увеличение HV , а в вертикальной в направлении корня шва — экспоненциальное уменьшение HV .

Такие изменения твердости металла литой зоны объясняются тем, что в условиях эксперимента корневая область швов охлаждалась с меньшей, а боковые поверхности области — с большей скоростью. При этом известно, что в процессе кристаллизации повышение скорости охлаждения способствует образованию менее пластичных структур.

В значительно большей степени данный эффект проявляется в металле зоны термического влияния (ЗТВ), протяженность которой в условиях экспериментов составляла около 2 мм (рис. 2). В металле данной области при сварке по штатной

технологии HV практически в 2 раза больше, чем в металле шва. Установлено, что применение ЭМВ практически не влияет на ширину ЗТВ. Однако при $B = 10$ мТл зафиксировано снижение HV на 15 %. Дальнейшее повышение индукции УМП не приводило к изменению HV . Одинаковый уровень твердости в областях ЗТВ, примыкающих как к боковым поверхностям, так и к корневой части швов, может свидетельствовать о незначительных отличиях скоростей охлаждения данных участков.

Оценку влияния ЭМВ на процессы кристаллизации осуществляли путем анализа микроструктур шлифов, изготовленных из исследуемых образцов. Установлено, что микроструктура металла швов, выполненных по штатной технологии, состоит преимущественно из перлита с очень тонкими ферритными прослойками по границам кристаллов (рис. 3, *a*). В образцах, полученных с применением ЭМВ, зафиксировано значительное уменьшение размеров кристаллов, особенно при $B = 10$ мТл.

Наряду с увеличением толщины ферритных прослоек обнаружены участки структурно свободного феррита, что может быть следствием повышения диффузионной подвижности углерода из-за уменьшения количества несовершенств кристаллической решетки (рис. 3, *b*).

Таким образом, для достижения максимального улучшения механических свойств металла швов при подводной мокрой сварке с ЭМВ индукция УМП должна быть в диапазоне $B = 10 \dots 15$ мТл.

Близкие геометрические параметры и химические составы металла свариваемых образцов, используемых при проведении данных исследований и приведенных в работе [3], позволяют осуществить сравнительную оценку полученных результатов. В обоих случаях зависимости σ_b и σ_t описываются кривыми с экстремумом, что позволяет оптимизировать режим ЭМВ. Однако в случае мокрой подводной сварки максимальное улучшение механических свойств достигают при меньших (на 25 %) индукциях УМП, что объясняется меньшим объемом расплава сварочной ванны.

При сварке на воздухе даже при малых значениях индукции зафиксировано увеличение σ_b и σ_t , что не обнаружено при проведении данных исследований. Указанное обстоятельство можно объяснить как различиями в методиках механических испытаний, так и большей вязкостью расплава при подводной сварке, что существенно ухудшает гидродинамику ванны при малых значениях индукции УМП.

Таким образом, применение ЭМВ при мокрой подводной сварке с оптимальными значениями индукции (10...15 мТл) УМП позволяет путем управления процессами кристаллизации повышать прочность (на 10 %) и пластичность (более чем на 60 %) металла сварных швов, что свидетельствует об улучшении качества сварных соединений.

1. Мельник Ю. П., Савич И. М., Глухова Е. В. Особенности термического цикла сварки низкоуглеродистой стали под водой // Автомат. сварка. — 1976. — № 1. — С. 17–21.
2. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецова, А. Н. Брикман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
3. Гаген Ю. Г., Мартынюк Т. А. Влияние параметров продольного магнитного поля на структуру и механические свойства сварных соединений газонефтепроводов // Автомат. сварка. — 1978. — № 9. — С. 37–38.
4. Влияние внешнего электромагнитного воздействия на содержание водорода в металле швов при мокрой подводной сварке / С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко, Р. Н. Рыков, В. А. Кожухарь // Там же. — 2003. — № 6. — С. 55–56.
5. Кораб Н. Г., Скачков И. О., Матяш В. И. Система управления электромагнитными воздействиями при сварке // Там же. — 1993. — № 11. — С. 52–53.

The modes of the external electromagnetic impact for the conditions of wet underwater welding were optimized, proceeding from analysis of experimental dependencies of the mechanical properties of the welds on induction of the controlling magnetic field.

Поступила в редакцию 14.05.2004



Разработано в ИЭС

МОДУЛЯТОР ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Модулятор сварочных параметров, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона, предназначен для работы совместно со сварочными тиристорными выпрямителями (например, серии ВДУ и др.) при ручной и механизированных способах дуговой сварки и наплавки плавящимся электродом. Он представляет собой программирующее устройство для широтно-импульсной модуляции выходного напряжения тиристорных сварочных источников с регулированием его по частоте и амплитуде при производстве сварочных и наплавочных работ. Это позволяет расширить технические возможности источников питания, регулировать энергетические и сварочно-технологические характеристики дуги, что приводит к повышению стабильности ее

горения (особенно на малых токах), расширению диапазона применяемых диаметров сварочных электродов и проволок, снижению их расхода за счет уменьшения разбрзывания, облегчению выполнения сварочных работ в вертикальном и потолочном положениях, повышению механических свойств сварных соединений.

Модулятор может быть выполнен как в одноканальном, так и в многоканальном исполнении.

*За дополнительной информацией обращаться
по тел. 227-44-78, 261-52-31.*

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
В. М. Нестеренков (ИЭС) защитил 29 сентября 2004 г. докторскую диссертацию на тему «Теория и практика устойчивого формирования швов при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины».

В работе развиты теоретические представления о гидродинамических процессах в расплавленном металле сварочной ванны и установлены особенности собственных колебаний расплава при его течении по стенкам парогазовых каналов большой глубины, определены условия устойчивого формирования сварных соединений и разработаны на этой основе промышленные технологии ЭЛС крупногабаритных изделий ответственного назначения.

К наиболее существенным научным результатам, полученным соискателем, относятся:

результаты исследований собственных колебаний расплавленного металла в парогазовых каналах большой глубины, позволившие показать, что первая гармоника колебаний расплава минимальной частотой и наибольшей амплитудой имеет существенное влияние на формирование сварных соединений большой толщины;

результаты исследований влияния отраженного пучка от длиниволновых возмущений поверхности жидкого металла передней стенки на образование дефектов в корне шва. Показано, что частота образования никелевых колебаний расплава в канале не влияют на величину никелевых дефектов;

установление факта, что стабильность формирования швов глубиной более чем 100 мм можно повысить путем наклона плоскости стыка и электронного луча на угол, близкий 10° к горизонту. При такой пространственной ориентации сварочной ванны увеличивается частота наиболее низких гармоник колебаний, уменьшается амплитуда возмущений поверхности расплава на передней стенке канала и, как следствие, повышается стабильность сварочного процесса в целом.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости сварочной ванны при ЭЛС металлов большой толщины с замыканием кольцевых швов легли в основу разработанных технологических процессов ЭЛС ряда изделий из низколегированной стали толщиной до 150 мм и алюминиевых сплавов толщиной до 300 мм, нападших применение в странах СНГ, Франции, Англии, Китая и США.

УДК 621.791(688.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Способ формирования внешних характеристик сварочного генератора в виде синхронной машины с обмоткой возбуждения возбудителя, отличающийся тем, что напряжение на обмотку возбуждения возбудителя подают от независимого источника постоянного напряжения через регулировочный элемент обмотки возбуждения и управляют регулировочным элементом дросселей через дополнительный регулировочный элемент от зажимов обмотки статора или от независимого источника постоянного напряжения. Патент РФ 2229365. Ю. С. Шевченко [15].

Способ вакуумирования заготовки для сварки совместным прессованием разнородных материалов, отличающийся тем,

что при откачке заготовку нагревают спаружи до температуры ниже температуры окисления более химически активного из свариваемых материалов, а время откачки выбирают экспериментально равным минимальному времени выдержки образца заготовки при параметрах вакуумирования заготовки, при котором более активный металл отвакуумированного образца не окисляется при температуре сварки совместным прессованием. Патент РФ 2229366. Н. Г. Фролов, В. Н. Елкин (ФГУП «НИКИ энерготехники») [15].

Световод для лазерного сваривания или резания неподвижных кольцевых стыков трубопроводов, содержащий поворотные зеркала, каждое из которых закреплено на кинематической паре, установленной в местах изменения направления осей звеньев световода. Приведены отличительные признаки световода. Патент РФ 2229367. Ю. В. Попадинец [15].

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях РФ «Изобретения. Полезные модели за 2004 г.» (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



Состав электродного покрытия для сварки углеродистых сталей, отличающийся тем, что он дополнительно содержит рутиловый концентрат, тальк, а также ильменитовый концентрат или железный порошок при следующем соотношении компонентов, мас. %: 20...24 рутилового концентрата; 5...8 каолина; 4...9 слюды мусковит; 16...18 силикомарганца; 14...20 талька; 13...16 мрамора; 9...12 ильменитового концентрата; 14...16 железного порошка; 1,5...2,0 целлюлозы. Патент РФ 2229368. Ю. П. Жуков, В. И. Иванов, С. А. Антипин и др. (ФГУП «Бийский олеумный завод») [15].

Способ подбора параметров для устройств газопламенной сварки и резки металлов, заключающийся в подборе соответствующих параметров на основании волновой теории горения, отличающейся тем, что сначала осуществляют подбор параметров с помощью диаграммы устойчивого горения пламени, построенной на координатной плоскости соответствующих параметров в виде совокупности подобных четырехугольников. Приведены и другие отличительные признаки способа. Патент РФ 2229369. Ю. К. Родин, Г. Л. Хачатрян [15].

Способ сборки и сварки конструкции металлического трубопровода, отличающийся тем, что при сборке крупногабаритного трубопровода каждый рукав пристыковывают к соответствующему патрубку трубчатого основания посредством проставок, обеспечивающих точное совпадение заданной геометрии конструкции трубопровода, полученные стыки сваривают одновременно двумя сварочными головками противоположно расположенным сначала относительно одной пары стыков, а затем другой пары противоположно расположенных стыков. Патент РФ 2229967. А. И. Григорьев, В. П. Семенов, Л. А. Аносова и др. (ОАО «НПО Энергомаша») [16].

Способ сварки стыков труб при изготовлении трубопроводов, отличающийся тем, что выполнение корневого шва осуществляют электроконтактной сваркой оплавлением, заполнение оставшейся части разделки начинают при температуре заваренного электроконтактной сваркой корневого шва, а разделку кромок выполняют с притулением толщиной d , которую определяют в зависимости от марки стали, толщины свариваемых труб, величины тепловложения при электродуговой сварке и темпа строительства трубопровода. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2229968. В. И. Хоменко, С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казымов и др. [16].

Способ защиты опорных подшипниковых узлов роторной машины от электрического сварочного тока при сварочных работах, осуществляемых при монтаже, ремонте агрегатов, отличающийся тем, что до проведения сварочных работ на металлических конструкциях, связанных с роторной машиной, в статоре роторной машины открываются технологические отверстия, вводят в отверстия токопроводящие штыри с развитой контактной поверхностью до контакта их с токопроводящей поверхностью ротора, а после проведения сварочных работ штыри удаляют и отверстия заглушают. Патент РФ 2230637. Ю. И. Кустов, В. И. Зарицкий, Ю. Л. Макаревич и др. (ОАО НПО «Искра») [17].

Способ стыковой сварки углеродистой полосовой стали толщиной от 2 до 6 мм перед травлением путем непрерывного оплавления торцевых кромок полос, отличающийся тем, что величину осадки выбирают с учетом содержания углерода в стали, при этом при содержании углерода до 0,1 % значения осадки Δ_{oc} принимают $\Delta_{oc} = (1,0...1,1)h$, при содержании углерода более 0,1 до 0,3% — $\Delta_{oc} = (1,12...1,3)h$, а после 32 ч работы электродов значения осадки увеличиваются для первой группы указанных сталей до $\Delta_{oc} = (1,15...1,25)h$, для второй группы — до $\Delta_{oc} = (1,30...1,45)h$. Патент РФ 2230638. Р. С. Тахаутдинов, А. И. Антипенко, А. А. Мухин и др. (ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат») [17].

Прокатный стан для холодного плакирования алюминия другими металлами, отличающийся тем, что он снабжен установленным непосредственно перед клетью деформирующим устройством, обеспечивающим активацию алюминия и разрушение поверхностной оксидной пленки путем проведения перед плакированием предварительной пластической деформации алюминиевой основы, при этом в зависимости от толщины и формы

металла деформирующее устройство выполнено в виде растяжной машины, или прокатной клети, или установки, создающей пластический изгиб. Патент РФ 2230639. Н. Д. Лукашкин, Л. С. Кохан, А. Н. Лукашкин (Московский государственный металлургический институт) [17].

Сопло для лазерной обработки, отличающееся тем, что по образующим вставки выполнены каналы, оси которых пересекаются внутри сопла, в кольцевом зазоре установлено кольцо, внутренняя поверхность которого образована круглым конусом, основание круглого конуса совмещено с основанием вставки, а патрубок для подачи газопорошковой смеси установлен тангенциально внутренней поверхности кольца. Патент РФ 2230640. И. И. Столяров, И. К. Бычков, В. Б. Середин (ОАО «Пермский моторный завод») [17].

Способ снижения остаточных напряжений трубопровода, включающий обжатие трубопровода в радиальном направлении на расстоянии от сварного стыка, отличающийся тем, что обжатие производят обмоткой трубопровода из предварительно натянутой высокопрочной нити. Патент РФ 2230641. Д. Н. Ковалев, А. В. Судаков, Б. П. Иванов, Е. В. Георгиевская (ОАО НПО по обследованию и проектированию энергетического оборудования) [17].

Способ изготовления волноводно-распределительных систем из алюминиевых сплавов, отличающийся тем, что все изготовленные детали, формирующие волноводно-распределительную систему, перед сборкой покрывают вначале функциональным слоем меди толщиной 6...15 мкм, затем оловосодержащим сплавом толщиной 0,5...1,5 мкм, собирают в единую конструкцию с взаимной фиксацией сопрягаемых деталей и паяют низкотемпературным припоем. Патент РФ 2230642. Б. П. Сучков, С. С. Симонова, В. В. Шаломеев (ОАО «НИИ приборостроения») [17].

Покрытие электрода для сварки, отличающееся тем, что оно дополнительно содержит волластонит, ферросиликомарганец и ферротитан при следующем соотношении компонентов, мас. %: 12...13 мрамора; 19...20 талька; 45...46 волластонита; 11...12 ферросиликомарганца; 11...12 ферротитана. Патент РФ 2230643. Д. П. Чепрасов, С. В. Кравченко, А. А. Ананьин, В. П. Петров (Алтайский ГТУ) [17].

Электрод для ручной дуговой наплавки слоя стали, отличающейся тем, что покрытие электрода дополнительно содержит ферротитан при следующем соотношении компонентов, мас. %: 11,0...16,0 мрамора; 12,0...17,0 рутила; 4,0...7,0 плавикового шпата; 2,0...3,5 полевого шпата; 8,0...10,0 ферромарганца; 1,5...2,6 ферросилиция; 1,0...1,9 органического пластификатора; 1,0...1,6 феррохрома углеродистого; 0,1...0,25 феррованадия; 1,2...2,4 ферротитана; остальное — железный порошок. Патент РФ 2230644. Н. В. Павлов, В. М. Кирьяков, А. В. Клапатюк [17].

Центратор для сварки труб, отличающийся тем, что резьба выполнена по всей длине стержня, а на противоположном от подвижного диска конце стержня установлен на резьбе опорный диск, при этом между подвижным диском и гайкой установлена пружина сжатия, а между опорным и подвижным дисками на стержень навернута стопорная втулка. Патент РФ 2231433. А. Н. Семенов, В. И. Тюрин, Г. П. Шевелев (ФГУП НИКИ энерготехники) [18].

Способ дуговой сварки деталей с большой разницей толщин, отличающейся тем, что в начале процесса сварки сварочной дугой прожигают отверстие в тонкой детали, затем через образовавшееся отверстие нагревают до оплавления поверхность толстостенной детали и создают на ней вторую сварочную ванну, а дугу перемещают над нахлесткой со скоростью, обеспечивающей отставание приэлектродного пятна на тонкой детали от оси электрода на расстояние, равное длине хвостовой части сварочной ванны на толстостенной детали. Патент РФ 2231431. Ю. В. Казаков, П. В. Корчагин (Государственное образовательное учреждение Тольяттинский госуниверситет) [18].

Способ диффузионной сварки разнородных сталей, включающий размещение между свариваемыми поверхностями двух



разнородных сталей прокладки из третьего металла, отличающейся тем, что прокладку выполняют из титана или его сплавов, соединение с титановой прокладкой нагревают до температуры, превышающей не менее чем на 15 °С температуру образования между титаном и одной из свариваемых сталей жидкой эвтектики, а после образования эвтектики ее выдавливают из стыка. Патент РФ 2231432. А. П. Семенов, В. Н. Тюрин, В. П. Гордо и др. (ФГУП НИКИ энерготехники) [18].

Устройство для газовой защиты сварного шва при автоматической сварке изделий из активных металлов, отличающееся тем, что защитный козырек выполнен в виде камеры, состоящей из двух корпусов, расположенных один в другом с образованием зазоров по периметру, основание внутреннего корпуса выступает из основания наружного корпуса, наружный корпус имеет узел для крепления козырька к горелке с возможностью свободного ее перемещения в вертикальной плоскости, а теплоотводящие прижимные пластины выполнены с горизонтальными уступами для установки на них основания внутреннего корпуса, образующими совместно с боковыми поверхностями корпусов козырька и зазорами между ними лабиринтное газовое уплотнение, при этом зазоры между корпусами, расположенные в торцах защитного козырька, обеспечивают газовую завесу. Патент РФ 2232069. А. Г. Астафьев (ОАО НПК «ИРКУТ») [19].

Способ изготовления слоистых пористо-компактных металлокерамических изделий, преимущественно на основе титановых сплавов, отличающийся тем, что прессовку формуют из металлического порошка с размером гранул 0,08...1 мм с пористостью, обеспечивающей возможность объемного газонасыщения, а спекание осуществляют в процессе диффузионной сварки с сохранением параметров пористости, после которой осуществляют термическую обработку в активной газовой среде. Патент РФ 2232070. В. Ф. Селиванов, В. В. Пешков, Л. В. Усачева (Воронежский ГТУ) [19].

Способ диффузионной сварки коротких толстостенных труб из разнородных металлов, отличающийся тем, что на одном или двух торцах соединяемых труб выполняют под углом к плоскости торца фаски с оставлением на торце кольцевого пояска, затем трубы собирают на стягивающем центраторе и стягивают между собой, центратор с трубами закрепляют во врачащем электронно-лучевой установки, врачают и оплавляют местостыковки электронным лучом, после чего его прогревают расфокусированным электронным лучом до тех пор, пока торцы труб загладятся и затем прогрев и сдавливание труб прекращают. Патент РФ 2232071. А. Н. Семенов, С. В. Онищенко С. В., В. Н. Тюрин и др. (ФГУП НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежаля) [19].

Неплавящийся электрод, состоящий из цилиндрического корпуса и рабочей поверхности, отличающейся тем, что нижняя часть цилиндрического корпуса переходит в треугольную призму со скругленными ребрами, представляющую в поперечном сечении равнобедренный треугольник, поверхность рабочей части электрода образована сечением его нижней части двумя наклонными к оси электрода плоскостями заточки электрода так, что линия пересечения этих плоскостей, являющаяся вершиной рабочей поверхности, перпендикулярна высоте равнобедренного треугольника и смешена от оси электрода в сторону вершины этого треугольника. Патент РФ 2232072. А. Г. Астафьев (ОАО НПК «ИРКУТ») [19].

Способ сварки в защитных газах с принудительным охлаждением шва и зоны термического влияния, отличающийся тем, что поток газа, охлаждающий кристаллизующийся металл,

закристаллизовавшийся металл шва и основной металл в зоне термического влияния, направлен к потоку, защищающему обратную сторону шва, внешне коаксиально. Патент РФ 2232668. С. Н. Власов, И. Е. Лапин, А. В. Совинов и др. (Волгоградский ГТУ) [20].

Способ электрошлаковой наплавки малогабаритных торцов изделий в вертикальном положении, отличающийся тем, что электрошлаковую наплавку осуществляют за счет введения в шлаковую ванну подключенного к независимому источнику питания неплавящегося полого электрода, выполненного с конусом на рабочей части на глубину, равную высоте конуса, с образованием в шлаковой ванне высокотемпературной области, размер которой ограничен 2...2,5 диаметрами упомянутого электрода, при этом через полость неплавящегося электрода в образовавшуюся высокотемпературную область подают наплавочный материал, а отношение сварочного тока к току, подаваемому на неплавящийся электрод, выбирают в пределах 1,3...2,0. Патент РФ 2232669. Г. И. Соколов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, С. И. Цурихин (То же) [20].

Устройство для защиты сварного шва, содержащее подвижно соединенные между собой звенья с системой подачи газа к месту сварки, отличающееся тем, что звенья установлены на гибкой оси с возможностью взаимного поджатия посредством пружины, а подвижное соединение звеньев представляет собой соединение по контактируемым поверхностям «шар-конус», при этом система подачи газа выполнена в виде центрального канала, образованного осевыми отверстиями, выполненными в звеньях, и соединенного с входным штуцером посредством канала, выполненного в первом звене в виде отверстия, и с распределительными каналами, выполненными в звеньях в виде дроссельных отверстий. Патент РФ 2233210. В. П. Гордо, В. Н. Елкин, К. Е. Страхов (ФГУП «НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежаля») [21].

Способ многопроходной сварки легированной стали в среде защитных газов, отличающийся тем, что выполняют щелевую разделку кромок, газовую защиту осуществляют двумя концентричными потоками, а сварку ведут на режимах, при которых время наложения последующих слоев шва меньше времени начала мартенситного превращения металла слоев и металла в зоне термического влияния. Патент РФ 2233211. Д. А. Чинахов, В. Т. Федыко, Ю. Н. Сараев (Томский политехнический университет) [21].

Откачное устройство, выполненное в виде емкости с откачным отверстием, под которым установленна сварочная прокладка, помещенное в рабочую камеру электронно-лучевой установки, отличающееся тем, что сварочная подкладка установлена с зазором между ней и нижней кромкой откачного отверстия, имеющим проходное сечение с площадью не менее откачного отверстия и не превышающей 1,5 площади откачного отверстия. Патент РФ 2233212. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев (ФГУП НИКИ энергетики им. Н. А. Доллежаля) [21].

Способ электронно-лучевого заваривания откачного отверстия в стенке вакуумируемой емкости путем оплавления кромки отверстия, отличающийся тем, что перед оплавлением кромки отверстия около него выполняют по крайней мере одну жидкую ванну, отделенную от края отверстия перемычкой, после чего перемычку расплавляют с образованием единой ванны жидкого металла и обеспечивают его частичное перетекание на стенку откачного отверстия в виде напльва. Патент РФ 2233213. А. М. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев (То же) [21].



ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*

SCHWEISS- & PRÜFTECHNIK(Австрия), 2004. — № 1
(нем. яз.)**Felber S.** Стали для трубопроводов, с. 2–7.**Aufrecht G.** Гармонизация неразрушающего контроля, с. 10.**Настольная** установка типа LR, с. 10.(Австрия), 2004. — № 2
(нем. яз.)**Felber S.** Сварка трубопроводов, с. 19–24.**Lorenz H., Killing R.** Синергетическая настройка установок для сварки ВИГ, с. 25–27.**Сокращение** времени сварки в арктических условиях на одну четверть, с. 28.**Новые** требования к испытаниям газопроводов, с. 30.**sudura**(Румыния), 2004. — № 1
(рум. яз.)**Gongalves V., Napoleao M.** Контактная точечная сварка оцинкованной стали. Ч. 2. Подвод тепла и механические испытания, с. 5–10.**Nicoara D. et al.** Электромагнитные гармонические заграждения при использовании оборудования для ультразвуковой сварки, с. 11–15.**Culda I.** Интегральная система при автоматизированном расчете технологий дуговой сварки плавлением в среде защитного газа, с. 16–22.*TRANSACTION of JWRI (Япония), 2003. — Vol. 32, № 1 (англ. яз.)*INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF JWRI
30th ANNIVERSARY
(Physics, Processes, Instruments & Measurements)*Международный симпозиум, посвященный 30-летию деятельности Японского института по соединениям и сварке:***Murphy B.** Повторная интерпретация разброса измерений температуры сварочной дуги и наличия местного термодинамического равновесия в дугах, с. 1–9.**Pekkari B.** Заботы об окружающей среде подгоняют разработку процессов сварки и их применения, с. 11–18.**Nakata K.** Новые материалы нуждаются в новых способах соединения, с. 19–24.**Miyamoto Y., Kirihara S.** Развитие «умных» способов обработки для новых видов соединений и материалов, с. 25–28.**Terasaki H.** Влияние анодного теплопереноса на проплавление шва при дуговой сварке ТИГ, с. 29–31.**Tanaka M. et al.** Численное исследование стационарного процесса сварки ТИГ, с. 33–34.**Murakami T. et al.** Разнородное нахлесточное соединение стали с алюминием с помощью дуговой высокотемпературной пайки МИГ, с. 35–37.**Fujie M.** Дуговая сварка МИГ магниевого сплава, с. 39–40.**Kim Y. G. et al.** Влияние направленного вниз давления инструмента при сварке трением с перемешиванием литого сплава ADC12 под давлением, с. 41–42.**Park H.-S. et al.** Сварка трением с перемешиванием меди и медных сплавов, с. 43–46.**Mori M. et al.** Применение нагрева миллиметрового диапазона при сканировании α -глинозема и γ -глинозема, с. 47–49.**Tsumura T., Serizawa H.** Разработка системы данных с искусственным интеллектом для сварки и соединения, с. 51–53.**Asakura Y., Tfrfhashi Y.** Определение геометрических характеристик профиля углового шва, выполненного бессвинцовным припоем и его применение для контроля, с. 55–58.

* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиографии ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заказам (заказ по тел. (044) 227-07-77, НТБ ИЭС).

Takahashi Y. et al. Исследование микроадгезионного соединения при комнатной температуре, с. 59–62.**Nishikawa H. et al.** Основные характеристики дуги полого катода как сварочного источника, с. 63–66.**Katayama S., Mizutani M.** Пояснение явления лазерной сварки и механизм образования пор, с. 67–69.**Naito Y. et al.** Характеристики проплавления и поведение факела при лазерно-дуговой гибридной сварке, с. 71–74.**Kawahito Y., Katayama S.** Контроль и адаптивное управление процессом лазерной точечной сварки, с. 75–78.**Lu S. et al.** Конвекция Марангони и проплавление при сварке А-ТИГ, с. 79–82.**Abe N. et al.** Обработка материалов диодными лазерами высокой мощности, с. 83–86.**Tsukamoto M. et al.** Образование пленки гидроксиапатита методом аэрозольного напыления, с. 87–90.**Bhadeshia H.K.D.H. et al.** Сварные соединения кремнистых бейнитовых сталей, с. 91–96.**Babu S. S. et al.** Расчет на научной основе микроструктуры металла шва, с. 97–105.**Ikeuchi K.** Роль микро- и наноразмерных подходов к процессам соединения и металлургии сварки, с. 107–112.**Takahashi M. et al.** Микроструктура и механические свойства металла швов высокопрочной стали класса 950 МПа, с. 113–114.**Takahashi M. et al.** Разработка микроструктуры поверхности раздела анодного соединения между алюминием и боросиликатным стеклом, с. 115–117.**Kitagawa Y. et al.** Характеристика ударного разрушения изделия из дуплексной нержавеющей стали, с. 119–120.**Yamamoto N. et al.** Влияние легирующих элементов на прочность раздела при сварке трением сплавов алюминия со сталью, с. 121–124.**Koizumi S. et al.** Влияние поверхностной обработки на прочность поверхности раздела диффузионного соединения олова в твердой фазе, с. 125–126.**Shibayanagi T., Maeda M.** Местные параметры микроструктуры поликристаллических материалов и расчет микроструктуры поверхности, с. 127–130.**Maeda M. et al.** Микроструктура поверхности раздела диффузионного соединения нитрида кремния в твердой фазе с использованием алюминиевой фольги, с. 131–132.**Maeda M., Shibayanagi T.** Микроструктура поверхности раздела алюминиевого сплава A7075 после сварки трением с перемешиванием, с. 133–134.**Jie Zhang et al.** Микроструктура поверхности раздела и реакционные фазы соединения $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$, выполненного высокотемпературной пайкой с помощью припоя Cu-Zn-Ti, с. 135–138.**Hafez K. M., Naka M.** Применение ультразвуковых волн в процессе высокотемпературной пайки глинозема меди с помощью припоя Zn-Sn, с. 139–142.**El-Sayed M. H. et al.** Ультразвуковая пайка алюминия с нержавеющей сталью, с. 143–146.**Takase H., Naka M.** Структура поверхности раздела и прочность паяных соединений $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ с использованием припоя Ni-Si-Ti, с. 147–148.**Matsumoto T. et al.** Разработка соответствующей системы капельницы для измерения термофизических свойств, с. 149–150.**Liu H. et al.** Место разрушения сварных соединений из сплавов AA2017-T351 и AA6061-T6, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 151–154.**Shen P. et al.** Смачивание монокристаллов α - Al_2O_3 жидким алюминием, с. 155–158.**Kirihara S. et al.** Контроль микроволнового излучения фотонных кристаллов с помощью изменения решетки, с. 159–161.**Morisada Y. et al.** Микроструктура и стойкость к окислению алмазных частиц с миллимикронным покрытием SiC , с. 163–165.



Ye F., Ohmori A. Фазовый состав и фотокаталитическая активность покрытий из TiO₂-Fe₃O₄ методом плазменного напыления, с. 167–174.

Nakade K. et al. Нанесение газотермических покрытий TiO₂ с помощью нанопорошков и их фотокаталитические свойства, с. 175–178.

Kanazawa T., Ohmori A. Нанесение фотокаталитических покрытий TiO₂ на полиэтилентерефталат с помощью плазменного напыления, с. 179–181.

Miyano Y. et al. Биообработка нержавеющей стали с помощью бактерий, с. 183–187.

Nowak A. S., Kaszynska M. Заданные уровни безопасности при проектировании и оценке мостов, с. 189–196.

Boitout F., Bergheau J.-M. Численное моделирование сварки в Европе — современные возможности и будущие направления, с. 197–206.

Murakawa H. Теоретическое прогнозирование и контроль сварочных деформаций крупных конструкций с учетом позиционирования и зазоров между частями, с. 207–213.

Murakawa H. Моделирование контактной сварки для выбора максимальных сварочных режимов и контроля процесса, с. 215–218.

Deng D. Теоретическое прогнозирование и контроль сварочных деформаций крупных конструкций с учетом позиционирования и зазоров между частями, с. 219–222.

Serizawa H. Теоретическое прогнозирование образования горячих трещин при сварке и их контроль, с. 223–226.

Kim Y.-C. et al. Свойства при разрушении и усталостные свойства крупногабаритных конструкционных элементов, изготовленных с помощью сварочной установки новейшей разработки, с. 227–230.

Sakino Y. et al. Способность к удлинению сварных швов в соединениях балок с колоннами, с. 231–234.

Sakino Y. et al. Мониторинг накопления нагрузок от движения транспорта на элементы мостов с помощью разрушаемых образцов для испытаний, с. 235–238.

Miyano Y. et al. Фундаментальные исследования по биообработке углеродистой стали железоокислительными бактериями, с. 239–242.



2004. — Vol. 83, № 1
(англ. яз.)

Still J. R. Водородные разрушения ферритных сварных швов, с. 26–29.

Hilkes J. et al. Электроды для сварки стали с 9 % никеля, с. 30–37.

Johnsen M. R. Выставка по сварке, организованная в Чикаго Американским сварочным обществом, с. 38–40.

WELDING RESEARCH SUPPLEMENT

Dave V. R. et al. Характер границ зерен в сплаве 690 и склонность к образованию трещин сварных швов нержавеющей стали, с. 1–5.

Kusko C. S. et al. Влияние микроструктуры на распространение усталостных трещин сварных швов нержавеющей стали, с. 6–14.

Rathod M. J., Kutsuna M. Соединение сплава алюминия 5052 и низкоуглеродистой стали с помощью лазерной сварки прокаткой, с. 16–26.

Choi et J.-H. et al. Механизмы образования дефектов типа оксидных включений в процессе высокочастотной контактной сварки, с. 27–31.

Flom Y., Wang L. Допуски на дефекты в паяных нахлесточных соединениях, с. 32–38.

Разработано в ИЭС

ГОРЕЛКА И ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ В УЗКУЮ РАЗДЕЛКУ

Разработана горелка специальной конструкции, предназначенная для сварки в узкий (16 мм) и глубокий зазор (до 90 мм) сталей толщиной до 90 мм и более.

Техническая характеристика горелки

Максимальный сварочный ток, А	400
Толщина свариваемого металла (при односторонней сварке), мм	до 90
Оптимальная ширина разделки, мм	16...20
Расход защитного газа, л/мин	12
Диаметр электродной проволоки, мм	1,0...2,3

Многослойная сварка в узкую разделку глубиной до 90 мм выполняется с попечными колебаниями электрода. В качестве защитного газа используется CO₂ или смесь Ar + CO₂.

Предложенные технологии позволяют сократить расход сварочных материалов, электроэнергии, продолжительность сварки, повысить механические свойства сварного соединения и служебные характеристики конструкции.

Область применения: тяжелое, химическое машиностроение, судостроение и др.



Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
ИЭС им. Е. О. Патона.

Тел./факс: (38044) 220 17 39 E-mail: savitsky@paton.kiev.ua



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ»

С 13 по 17 сентября в пос. Кацивели (Крым) на базе Дома творчества ученых состоялась Вторая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». Организаторы конференции: ИЭС им. Е.О. Патона и Международная ассоциация «Сварка». Информационную поддержку конференции оказали журналы «Автоматическая сварка», «The Paton Welding Journal», «Biuletyn Spawalnictwa». Сопредседатели Программного комитета конференции — академики И. К. Походня и В. И. Махненко.

В работе конференции приняло участие более 60 ученых и специалистов из Украины, России, Белоруссии, Германии, Польши, Канады и Японии, представляющие такие ведущие центры в области математического моделирования явлений, протекающих при сварке, как: ИЭС им. Е.О. Патона, Институт сварки и соединений (г. Аахен, Германия), Московский энергетический институт, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» (С.-Петербург, РФ), Научно-исследовательский и конс-

трукторско-технологический институт сварки и защитных покрытий (Минск, Беларусь), Институт сварочных технологий (Университет г. Хемница, Германия) и др. Работа конференции была организована в виде сессий пленарных и стендовых докладов.

Большой интерес у участников конференции вызвали доклады, подготовленные известными специалистами в области математического моделирования. В обзорном докладе Махненко В. И. «Успехи математического моделирования и информационных технологий в сварке и родственных процессах» подчеркнуто, что непрерывное развитие вычислительной техники является мощным стимулом для создания с помощью математического моделирования и информационных технологий эффективных средств для значительного снижения объемов дорогостоящих экспериментов при исследованиях и, главное, разработке рациональных технологических процессов сварки, наплавки, нанесения покрытий, получения слитков спецэлектрометаллургии. Отмечая значительную роль коммерческих пакетов компьютерных программ типа SYSWELD, ANSYS и других при решении конкретных



задач, автор доклада указал, что традиционное направление создания оригинального проблемно-ориентированного математического обеспечения для решения актуальных задач в области сварки и родственных технологий еще достаточно широко используется на практике, для чего имеется целый ряд объективных обстоятельств. В этой связи для коллективов специалистов, имеющих достаточно широкий опыт в математическом моделировании и численном решении соответствующих задач (тепломассоперенос, химический состав, микроструктура и свойства, напряжения и деформации, риск образования горячих и холодных трещин), достаточно привлекательным является путь синтезирования рабочих программ из более или менее готовых моделирующих блоков и информационных баз. Такой путь для решения конкретных технологических задач не представляет существенных трудностей, причем, он значительно дешевле аренды на соответствующий срок коммерческого пакета. Аналогично могут быть синтезированы рабочие программы для решения задач, связанных с прочностью сварных узлов (соединений) при различных условиях нагружения (статика, усталость) с учетом дефектов, агрессивности сред, высоких температур.

В докладе Е. А. Асниса, В. Ф. Демченко, А. Б. Лесного, С. П. Заболотина «Компьютерное моделирование гидродинамики и тепломассообмена при выращивании монокристалла кремния методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки» для отработки параметров режима плавки при проведении космических экспериментов разработана осесимметричная модель конвекции расплава, а также связанные с ней модели тепловых и массообменных процессов. Модель гидродинамических процессов базируется на полной системе уравнений гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости с учетом взаимодействия термогравитационной и термокапиллярной конвекции. Модель тепловых процессов описывает совместный кондуктивно-конвективный перенос энергии при изменяющихся в зависимости от температуры теплофизических свойствах материала с учетом выделения скрытой теплоты на фронте кристаллизации (плавления) и радиационного теплообмена поверхности образца со стенками камеры (теплового экрана).

В докладе Ю. С. Борисова, А. С. Зацерковного, И. В. Кривцун «Численный анализ процессов теплообмена дуговой плазмы с мелкодисперсными металлическими частицами» предложен оригинальный подход для анализа теплового воздействия дуговой плазмы на частицы дисперсного материала с учетом их испарения в условиях плазменного напыления и порошковой наплавки.

В докладе У. Дилтая, В. Павлыка, О. Мокрова, И. Дикшева «Математическое и компьютерное моделирование процесса многопроходной дуговой сварки высококарбидистых сталей металлическим электродом в защитных газах с предварительным нагревом» модель однопроходной сварки в среде защитных газов (модель приведена на предыдущей конференции ММИТWRP-2002) расширена на многопроходную сварку толстых пластин.

Сквозная компьютерная технология проектирования, инженерного анализа и подготовки производства несущих сварных конструкций приведена в докладе В. И. Дьяченко, С. В. Медведева, О. П. Чижка «Суперкомпьютерное

конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций.

Доклад Ю. В. Каширского «Информационный банк по машиностроительным материалам» посвящен банку данных, содержащему сведения о более чем 2 тыс. отечественных материалах, среди которых свыше 100 чугунов и 300 сплавов (жаропрочные, жаростойкие и коррозионностойкие, на никелевой основе, титановые, магниевые и медные). В данных отражено состояние приблизительно по 300 параметрам. Параллельно введена информация по 22 тыс. иностранных марок. В подсистеме «Сварка» для каждого материала даны сведения о способах сварки, склонности к образованию трещин, необходимости подогрева. Кроме того, разработаны программы, позволяющие определить эти характеристики по химическому составу. Имеется возможность определять взаимосвариваемость материалов.

Доклад В. А. Швецовой, Б. З. Марголина, В. И. Смирнова, А. И. Минкина «Основные подходы к оценке и учету свойств антикоррозионной наплавки при расчете хрупкой прочности корпусов атомных реакторов» описывает разработку процедур оценки и учета свойств наплавки при расчете хрупкой прочности корпуса атомного реактора и создания базы расчетных характеристик антикоррозионной наплавки для прочностных расчетов корпуса реактора с учетом свойств наплавки.

В докладе А. Бокоты, В. Пекарской «Напряженное состояние сварных соединений, выполненных лазерной сваркой с подогревом» представлены математическая модель и расчетный метод оценки деформаций и напряжений при лазерной сварке расщепленным лучом с подогревом. Первый луч меньшей мощности выполняет функцию подогрева, второй луч большей мощности — сварки.

В докладе Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розинки, Н. И. Пивторак «Расчетный алгоритм оценки допустимых размеров непровара в сварных соединениях, работающих при сложном спектре циклических нагрузок» рассмотрен численный алгоритм оценки допустимых непроваров в соответствующих сварных соединениях рам ветроэнергетических установок при сложном спектре циклических нагрузок (усилий и моментов) на базе $2 \cdot 10^8$ циклов.

Во время конференции были проведены компьютерные демонстрации программного обеспечения, которые вызвали большой интерес среди участников.

Организаторы конференции планируют к концу 2004 г. издать сборник трудов конференции, с которым можно будет ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е.О. Патона или в редакции журнала «Автоматическая сварка». Сборник трудов конференции можно заказать в Международной ассоциации «Сварка», тел.: (38044) 261-54-03, 269-26-23, e-mail: journal@paton.kiev.ua.

Следующая, Третья международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (ММИТWRP-2006) состоится в 2006 г. (дата и место проведения уточняются, следите за объявлениями в журнале «Автоматическая сварка»).

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



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР «СОВРЕМЕННОЕ СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ СВАРКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

В начале сентября ОАО Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА» (г. Симферополь) совместно с НПФ «Инженерный и технологический сервис» (г. Санкт-Петербург) провели ежегодный международный семинар «Современное сварочное оборудование и процессы сварки в промышленности» для главных сварщиков промышленных предприятий Украины и предприятий нефтегазовой промышленности России.

В семинаре участвовали 60 специалистов по сварке из различных отраслей. Характерно, что многие из них работают главными сварщиками на крупных промышленных предприятиях, таких, как «Завод им. Малышева», Машзавод «Свет Шахтера», Завод металлоконструкций им. Бабушкина, «Криворожсталь», Металлургический комбинат им. Дзержинского, Херсонский судостроительный завод, Крюковский вагоностроительный завод, Киевский мотоциклетный завод, Макеевский завод металлоконструкций, «СиЭнЖиЭс Инжиниринг», Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича, Стахановский вагоностроительный завод, Запорожский завод высоковольтной аппаратуры, ДнепроПСТаль и др.

Участники семинара посетили производственные цеха и ознакомились с технологией производства электросварочного оборудования, специалисты завода продемонстрировали в работе новейшие модели сварочных универсальных источников ВД-506ДК и ВДУ-511, сварочных полуавтоматов ПДГО-511, ПДГ-602 и малогабаритного подающего механизма ПДГ-422 для совместной работы с универсальным сварочным конвертором КСУ-320 от многопостовых источников, а также новую разработку для автоматической сварки под слоем флюса — сварочный трактор АДФ-1000 в комплекте с источниками ВДУ-1000 и ВДУ-630.

Наибольший интерес нефтяников и газовиков привлекла новая модель сварочной мультисистемы на базе универсального источника ВД-506ДК, специально разработанная для сварки стыков труб в трассовых условиях, а также для использования в качестве источников сварочных головок орбитальной автоматической сварки в среде защитных газов и самозащитными порошковыми проволоками. В настоящее время есть заключения на технологические процессы сварки труб, которые вошли в ведомственные руководства «Газпрома» по ведению сварочных работ на источниках ВД-506ДК при строительстве и ремонте нефтегазотрубопроводов. Использование источников ВД-506ДК рекомендовано Всероссийским научно-исследовательским институтом сварки труб (г. Москва) для строительства нефтегазопроводов. На сегодня источники ВД-506ДК прошли апробацию и успешно эксплуатируются на строительных объектах «Газпром», «Транснефть» (Россия) и на верфях Северодвинского судостроительного завода «Звездочка».



Впервые «Фирма СЭЛМА» на семинаре демонстрировала уникальное, не имеющие аналогов в Украине оборудование для автоматизации процессов подготовки швов, сварки и резки — несущую конструкцию для механизации процесса сварки GK-200 КАТ, а также для механической подготовки кромок листовых материалов и торцов труб под сварку высокоскоростную и мобильную кромкоскальывающую машину GBM-18. Предлагаемое оборудование позволяет сократить время производства, увеличить эффективность и снизить затраты на проведение сварочных работ.

Несущая конструкция GK-200 КАТ обеспечивает совершение колебательных движений горелки при сварке корневых и заполняющих швов больших толщин во всех пространственных положениях. Несущая конструкция может передвигаться по жесткой или гибкой направляющей любой конфигурации. Преимущество оборудования состоит в том, что оно позволяет производить сварку и резку в любом пространственном положении, включая орбитальную, при этом сокращает время производства с одновременным улучшением качества сварочного шва.

При сварке металлов толщиной более 5 мм трудно получить гарантированное сплошное проплавление, поэтому согласно нормативной документации необходима специальная разделка кромок. Использование машин GBM-18 позволяет увеличить производительность труда, упростить технологический процесс сборки и сварки металлоконструкций, а также минимизировать затраты труда при гарантии точного соответствия получаемой кромки стандартам.

С целью повышения качества шва и ускорения процесса односторонней сварки «Фирма СЭЛМА» предложила на семинаре применять в сварочном производстве самоклеющиеся керамические подкладки. Использование керамических подкладок является простым и эффективным методом для получения качественного шва под кон-

троль рентгеновским излучением. Кроме того, керамические подложки окапают сами себя, так как способствуют высокому качеству односторонней сварки, без затрат на устранение дефектов и на трудоемкую и дорогостоящую механическую обработку.

Область применения предлагаемого оборудования очень широка, может применяться в судостроении и судоремонте, для сварки труб и трубопроводов, в мостостроении и в строительстве промышленных резервуаров.

На семинаре специалисты по сварке нефтегазовой промышленности обсуждали вопросы технологии сварки корневого и заполняющего швов стыков труб, а также вопросы проведения аттестации сварочного оборудования и сварщиков. С интересом были прослушаны доклады:

- «Технология и методы сварки неповоротных стыков труб» («Стройтрансгаз», г. Москва);
- «Приборы и методы регистрации сварочных процессов» (НАКС, г. Москва);
- «Сварочные горелки фирмы «BINZEL» для всех видов сварки» («BINZEL», Германия);
- «Вопросы качества сварных соединений неповоротных стыков труб» (ВНИИСТ, г. Москва);
- доклад о Волжском трубном заводе (г. Волжский), в ходе которого был высказан интерес к источникам пе-

ременного тока на 1000 и 1250 А (аналоги TAF, ESAB) для комплектации сварочных автоматов;

- «О подготовке и аттестации сварщиков» (Учебный центр «Лукойл», г. Пермь);
- «Использование ВД-506ДК в качестве источников для сварки стыков труб» («ИТС»).

В ходе семинара специалисты крупнейших предприятий Украины и России ознакомились с новейшими разработками сварочного оборудования, приняли предложения взять на испытания заинтересовавшее их сварочное оборудование. Главные сварщики украинских предприятий в ходе семинара подготовили технические задания и спецификации для приобретения необходимого электросварочного оборудования.

В заключение следует отметить, что тематические семинары и конференции по вопросам применения электросварочного оборудования в различных отраслях промышленности «Фирма СЭЛМА» и НПФ «ИТС» (г. С.-Петербург) проводит ежегодно. Приглашаем всех заинтересованных специалистов сварочного производства принять участие в семинарах будущего года.

Заместитель начальника отдела маркетинга и сбыта ОАО «Фирма СЭЛМА» С. В. Раков.

Разработано в ИЭС

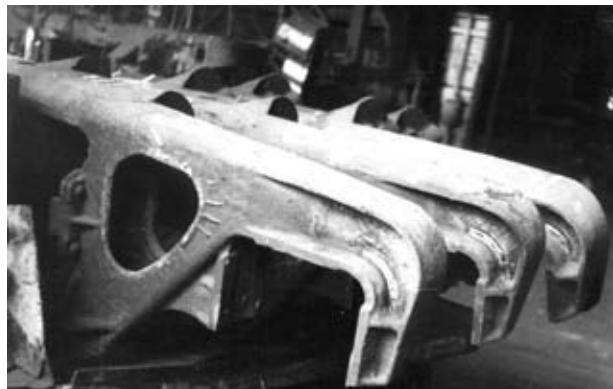
ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА СВАРКОЙ УЗЛОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Разработана технология заварки трещин в таких ответственных узлах железнодорожных вагонов, как автосцепка и тяговые хомуты (автосцепное устройство), надрессорные балки, боковые рамы тележек вагонов, стойки грузовых полувагонов. Все указанные несущие детали, кроме стоек, изготавливаются из трудносвариваемых литьих углеродистых низколегированных конструкционных сталей типа 20Л, 20ГЛ, 35Л и др. Разработанная технология ремонта сваркой исключает необходимость специального предварительного подогрева деталей и последующей термообработки. При этом сварные соединения не имеют дефектов и равнопрочны основному металлу.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
ИЭС им. Е. О. Патона
Тел./факс: (38044) 227 31 84
E-mail: maksimov@paton.kiev.ua



Заваренная трещина в корпусе автосцепки в месте перехода хвостовика к головке



Заваренные продольные трещины в боковых рамках тележек

ПРОИЗВОДИТЕЛИ ТОВАРОВ И УСЛУГ В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1. Источники питания для дуговой и электрошлаковой сварки

Авантаж ЧП, Автоген-Техно ООО, Антарес-К ООО, Белгазпромдиагностика, БелСваМо, Белфон ЗАО, Ватра МП, Велга Вильнюс ЗАО, Вэлдинг ООО, Велдинг Эллоис ЗАО, Газстройсервис АООО, ГРПЗ, ДнепроСварка ООО, Дюкон ПГ, Зодиак ООО, Инвертор плюс, Инпат ГВТП, Институт сварки России, Инструменты ООО, Искра ЗАО, ИТС, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, КЭЭСО АО, Коммунар ПО, Корба НПФ, Кристалл М, Кристалл ОАО, Линкор ООО, Машагропром ЗАО, Маяк АО, Мессер, Мобисвар ЗАО, Мульти Саунд компания ЗАО, НГС-Комплект, Оборудование и машины ЗСО, ОЗСО ИЭС. Особые сварочные агрегаты НПВФ ООО, Плазма НПП ООО, Полтавский турбомеханический завод ПО, Пошук НТП, Президент-Нева ООО, Промэл-2000, Псковэлектросвар ЗАО, Радис ИЦ, Рик НПФ ООО, Ро-Ар ООО, Рослов, РУСО ООО, Сварка НПП, Сварприбор ООО, Северная электротехническая компания, Симферопольский моторный завод ОАО, Спецэлектрод АО, Стецекевич ЗАО, СЭЛМА фирма, ТАС фирма, Технолазер, Техносваркомплект ООО, Технотрон НПП, Техстройсервис, Тор фирма, Торговый Дом Сварка СП, Трансмаш ОАО, Триада-Сварка, Уралтермосвар ЗАО, ФЕБ НПП ООО, Фрониус-Факел ООО, Центроэнергомонтаж ОАО, Эконика-Техно ЗАО, Экотехнология ГВП, Экспловелд СП, Электрик ОАО, Электрик-Микс ЗАО, Электромеханика ОАО, Электротермосвар АО, Эллой ООО, Элмид-Техно ЗАО, Элмис ОАО, Элсвар фирма, ЭПИС, Z-Мастер ЗАО

2. Полуавтоматы для дуговой сварки

Авиасварка НТЦ, Автомеханика ЗАО, Антарес-К ООО, Артем ГАХК, Белгазпромдиагностика, БелСваМо, Белфон ЗАО, Ватра МП, Вэлдинг ООО, Вэлдинг Эллоис ЗАО, Дюкон ПГ, Зодиак ООО, Институт сварки России, Инструменты ООО, Интертехприбор, Искра ЗАО, ИТС, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, КЭЭСО АО, Коммунар ПО, Корба НПФ, Крейд ООО, Кристалл М, Кристалл ОАО, Линкор ООО, Машагропром ЗАО, Медикомс фирма ООО, Метон МП ООО, Мульти Саунд компания ЗАО, НГС-Комплект, Навко-Тех фирма, Оборудование и машины ООО, ОЗСО ИЭС, Полтавский турбомеханический завод ПО, Плазма НПП ООО, Пошук НТП, Псковэлектросвар ЗАО, Пульсар ММПП, Радис ИЦ, Рик НПФ ООО, Ро-Ар ООО, Сварприбор ООО, Северная электротехническая компания, Симферопольский моторный завод ОАО, СЭЛМА фирма, ТАС фирма, Технолазер, Техносваркомплект ООО, Технотрон НПП, Тор фирма, Торговый Дом Сварка СП, Тэсса ООО, Уралтермосвар ЗАО, Фрониус-Факел ООО, Щорский электромеханический завод ОАО, Эконика-Техно ЗАО, Экотехнология ГВП, Экспловелд СП, Электрик ОАО, Электрик-Микс ЗАО, Электромеханика ОАО, Электротермосвар АО, Эллой ООО, Элмид-Техно ЗАО, Элмис ОАО, Элсвар фирма, Z-Мастер ЗАО

3. Автоматы для дуговой сварки

Авантаж ЧП, Авиасварка НТЦ, Белгазпромдиагностика, БелСваМо, Белфон ЗАО, Вэлдинг ООО, Вэлдинг Эллоис ЗАО, Дюкон ПГ, Зодиак ООО, Импульс ОКБ, Институт сварки России, Инструменты ООО, Интертехприбор, Искра ЗАО, ИТС, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, КЭЭСО АО, Констар ООО, Корба НПФ, Кристалл М, Кристалл ОАО, Мессер, НГС-Комплект, Навко-Тех фирма, НИТИ Прогресс, Оборудование и машины ЗСО, Полисуд С.С.С., Полтавский турбомеханический завод ПО, Псковэлектросвар ЗАО, Радис ИЦ, Ро-Ар ООО, Рослов, Сварприбор ООО, Северная электротехническая компания, Симферопольский моторный завод ОАО, СЭЛМА фирма, Технолазер, Техносваркомплект ООО, Технотрон НПП, Тор фирма, Торговый Дом Сварка СП, Уралтермосвар ЗАО, Фрониус-Факел ООО, Эконика-Техно ЗАО, Экотехнология ГВП, Экспловелд СП, Электрик ОАО, Электрик-Микс ЗАО, Электромеханика ОАО, Электротермосвар АО, Элсвар фирма, Z-Мастер ЗАО

4. Оборудование для электрошлаковой сварки

Инпат ГВТП, КЭЭСО АО, КЭМЗ СВАРКА ЗАО

5. Оборудование и инструмент для дуговой и контактной сварки

Абикор Бинцель Сварочная Техника ООО, Авантаж ЧП, Агни ООО, Аллплаз АОЗТ, АНИТИМ ОАО, Антарес-К ООО, Антек ЗАО, БелСваМо, Бастион, Белфон ЗАО, Бинцель Украина ГмбХ, Велга АО, Велдотерм, Дюкон ПГ, Ильинский опытный завод механического сварочного оборудования, Инженерный и технологический сервис, Инпат ГВТП, Инструменты ООО, Искра ЗАО, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Кермет-У ООО,

КЭЭСО ОАО, Контур-97, Корба НПФ, Корд ООО, Красный выборжец ОАО, КЭМЗ СВАРКА ЗАО, Линкор ООО, Метон МП ООО, Мидасот-Т ЗАО, НГС-Комплект, НИТИ Прогресс, Оборудование и машины ЗСО, Орион Гринева ЗАО, Пензенское КТБ арматуростроения ОАО, Пошук НТП, Прометей ИТЦ, Псковэлектросвар ЗАО, РУСО ООО, Сварка, Северная электротехническая компания, СЭЛМА фирма, ТАС фирма, Техносваркомплект ООО, Технотрон НПП, Триада-Сварка, Укркомплект, УкрИСП ОАО, Уралэлектромедь АО, Фрониус-Факел ООО, Экотехнология ГВП, Экспловелд СП, Электрик ОАО, Электрик-Микс ЗАО, Электромеханика ОАО, Электротермосвар АО, Элмид-Техно ЗАО, Энерготехника концерн ЗАО

6. Оборудование для специальных способов сварки (холодной, трением, плазменной, электронно-лучевой, лазерной, ультразвуковой, высокочастотной и др.), термической обработки

Булат ОКБ, Велдотерм ООО, Велдотерм-Украина, Велд Форс, ВНИИ ТВЧ им. В. П. Вологодина, Инпат ГВТП, Искра ЗАО, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Мессер, Мидасот-Т ЗАО, Мультиплаз ОАО, НИТИ Прогресс, ОЗСО ИЭС, Торговый Дом Сварка СП, УКРСПЕЦТЕРМ ЗАО, Фрониус-Факел ООО, Электромеханика ОАО, ЭЛТЕРМ НПП, Selmi ЗАО, Z-Мастер ЗАО

7. Роботы сварочные

АвтоВАЗ, Гранат НПО, Искра ЗАО, Мессер, Навко-Тех фирма, Фрониус-Факел ООО

8. Механическое сварочное оборудование

Ильинский опытный завод механического и сварочного оборудования, Импульс ОКБ, Индустральные Портативные машины ООО, Инпат ГВТП, КЭМЗ СВАРКА ЗАО, Навко-Тех фирма, УкрИСП ОАО

9. Оборудование для пайки

Донмет завод автогенного оборудования ООО, Инпат ГВТП, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Лига ЗАО, Мидасот-Т ЗАО, ТАС фирма, Фрониус-Факел ООО, Электротермосвар АО

10. Оборудование для наплавки

Дюкон ПГ, Инпат ГВТП, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, КЭЭСО АО, КЭМЗ СВАРКА ЗАО, НИТИ Прогресс, Плазма-Мастер НПФ, ТАС фирма, Тена ТЦ ООО, Фрониус-Факел ООО, Электрик ОАО, Электротермосвар АО

11. Оборудование для газовой сварки

Авантаж ЧП, AGA, Барнаульский аппаратурно-механический завод АО, БелСваМо, Белфон ЗАО, Ватра МП, Велга АО, ВКЗ ОАО, ВНИИАВТОГЕНМАШ ФГУП, Газосварочные аппараты, Джет ЗАО НПФ, Днепрокислород ОАО, ДнепроСварка ООО, Донмет завод автогенного оборудования ООО, Интерфакел СП, Корд ООО, Красс СП ЗАО, Мессер, Мидасот-Т ЗАО, Нерпа судоремонтный завод ФГУП, НИКТИ СП с ОП, Ро-Ар ООО, РУСО ООО, Сварка-Контакт Сервис НПП, Сварочная техника, Триада-Сварка, Укркомплект, Уралтехгаз ОАО, Эллой ООО, Элмид-Техно ЗАО

12. Оборудование для нанесения упрочняющих и защитных покрытий

Авантаж ЧП, Автогенмашкомплект ООО, Барнаульский аппаратурно-механический завод, ВНИИАВТОГЕНМАШ ФГУП, Институт проблем надежности и долговечности машин, Интерфакел СП, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Мидасот-Т ЗАО, НИКТИ СП с ОП, Плазма-Мастер НПФ, ТАС фирма, Тена ТЦ ООО, ТОПАС, УкрИСП ОАО, Фрониус-Факел ООО

13. Оборудование для газокислородной, плазменной и термической резки металлов

Абикор Бинцель Сварочная Техника ООО, Авантаж ЧП, Автогенмашкомплект ООО, AGA Украина ОАО, АНИТИМ ОАО, Антек ЗАО, Барнаульский аппаратурно-механический завод АО, БелСваМо, Белфон ЗАО, Бинцель Украина ГмбХ, Ватра МП, Вектор ФГУП, Велга АО, ВНИИАВТОГЕНМАШ ФГУП, Дамал ООО, Джет ЗАО НПФ, Днепрокислород ОАО, Донмет завод автогенного оборудования ООО, Дюкон ПГ, Енагро-Торец ООО, ЗОНТ ОАО, Инженерный и технологический сервис, Импульс ОКБ, Инструменты ООО, Интертехприбор, Интерфакел СП, Искра ЗАО, Кермет-У ООО, Кислородмаш ООО, Кислородный завод ЗАО, Корба НПФ, Красс СП ЗАО, Кристалл М, Кристалл ОАО, КСТ-Авиа, КЭМЗ СВАРКА ЗАО, Лига ЗАО, Мессер, Мессер Каттинг и Велдинг, Мидасот-Т ЗАО, Мобисвар ЗАО, Мультиплаз ОАО, НГС-Комплект, Нерпа судоремонтный завод ФГУП, НИТИ Прогресс, НТМ-ПЛЮС ООО, Пензенское КТБ арматуростро-

ения ОАО, Плазмотрон НПФ, Пошук НТП, Рик НПФ ООО, Ро-Ар ООО, Сварка-Контакт-Сервис НПП, Сварочная техника, Сварприбор ООО, Северная электротехническая компания, СКТБ СТО ЗАО, Стецкевич ЗАО, ТАС фирма, Термал-Спрей-Тек, Техмонтажсистем ООО, Торговый Дом Сварка СП, Техмаш АО, Технолазер, Техстройсервис, Укр-риСП ОАО, Фрониус-Факел ООО, Экотехнология ГВП, Экспловелд СП, Электрик ОАО, Электрик-Микс ЗАО, Электротермосвар АО, Энергомаш ЗАО, Энергомеханика ОАО, Энерготехника концерн ЗАО, Эффект АО

14. Оборудование для производства сварочных материалов:

а) покрытых электродов

Белгазпромдиагностика, Вант, Велма ООО, Инпрат ГВПП ИЭС им. Е. О. Патона НТК, НИИмонтаж ОАО, Новэл ЗАО, НПП «Сварпро-М» ООО, ОЗСО ИЭС, Ротекс ЗАО, Спецэлектрод АО, Торговый Дом Сварка СП, Тяжпрессмаш ОАО, Экспловелд СП

б) порошковых проволок НИИмонтаж ОАО, НИЦ МСН, ОЗСО ИЭС НТК

15. Оборудование для улавливания сварочных аэрозолей и очистки воздуха в зоне сварки

Агробэлэкс НПП, Амкадор-Рэн-Монарс ЗАО, Гуматекс ЧП, Джимль НПФ ЧП, Диокон ПГ, Инпрат ГВПП, Инструменты ООО, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Консар ОАО, Сизод НПФ, Совглим ЗАО, ФХИЗОСиЧ, Элстат

16. Средства индивидуальной защиты сварщика

Авантаж ЧП, Александр Соколов ЧП, Амкадор-Рэн-Монарс ЗАО, Белгазпромдиагностика, Белфлон ЗАО, Ватра МП, Дамал ООО, Днепрометиз ОАО, Дуга ЗАО, Запорожский сталепрокатный завод ОАО, Инвертор плюс, Инструменты ООО, Интер Метиз ЗАО, Интерхим-М ЗАО, Контакт НПП, Корба НПФ, Кроцекс ООО, Метизы Торговый дом ООО, ММК-МЕТИЗ, Плазма НПП ООО, Пошук ЗАО НТП, Промэл-2000, Пульсар ММПП, Рослов, Сбормаш ООО, СВ Технология ООО, Сварка (Москва) ООО, Серп и Молот ОАО, Спецсплав ЗАО, Стальметиз ОАО, Торговый Дом Сварка СП, Череповецкий сталепрокатный завод ОАО, Экотехнология НПП, Экспловелд СП, Z-Мастер ЗАО

менты ООО, Интерхим-М ЗАО, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Контакт НПП, Корба НПФ, Кранэкс ОАО, Кременчугский электродный завод, Крюковский вагоностроительный завод ОАО, Лосиноостровский электродный завод ОАО, Межгосметиз-Мценск ОАО, Мидасот-Т ЗАО, Московский электродный завод ОАО, ММК-МЕТИЗ, МММЗ ОАО, Нальчикский электродный завод ОАО, «Наташа» ЧП, Невинномысский электродный завод ОАО, Нижегородский теплоход завод ОАО, НИИмонтаж ОАО, НИЦ МСН, ОЗСМ ИЭС, ОМЗ-Инструмент ООО, ОСП «Элком» ОАО, Орнито НПФ, ОСПАЗ ОАО, ПАТОН-Электрод НПФ, Победа труда машзавод ОАО, Приватбуд ООО, Прометей ИТЦ, Пульсар ММПП, Рослов, Сбормаш ООО, Свама ЗАО, СВАРОГ-Т НПФ, Сварочная техника, СВ Технология ООО, СВЭЛ ОАО, Свэмс ООО, Северная электротехническая компания, СЗСМ «Ротекс» ООО, Сибэс ЗАО, Сиулр ОАО, СМ НПО им. Фрунзе ОАО, Спецэлектрод ОАО, Стакс ОАО, Стальметиз ОАО, Сычевский электродный завод, Торговый Дом Сварка СП, Торезтврдосплав ОАО, Уралхиммаш ОАО, Харцызский ремонтно-механический завод, Хобэкс ПК, ЧСПЗ ОАО, ШЭЗ ОАО, Экотехнология ГВП, Экспловелд СП, Экспериментальное производство ИЭС им. Е. О. Патона, Электрод ЗАО, Электродный завод АОЗТ, Электродсервис ЗАО, ЭМК-Атоммаш ОАО, Z-Мастер ЗАО

4. Присадочные материалы для пайки

Авиасварка НТЦ, Инпрат ГВПП, ИЭС им. Е. О. Патона НТК, Мегатекс ЗАО, ОЗСМ ИЭС, Рослов, Спецсплав ЗАО, Торговый Дом Сварка СП

5. Флюсы для сварки

Бастион, Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий, Ижорские заводы ОАО, Инженерный и технологический сервис, Инпрат ГВПП, Инструменты ООО, Интерхим-М ЗАО, Коин ООО, Контур-97, Никопольский завод ферросплавов ОАО, ОЗСМ ИЭС, ОМЗ-Инструмент ООО, Сварка, Рослов, Торговый Дом Сварка СП, ЦНИИТМАШ НПО

6. Ферросплавы и лигатуры

Карбид ООО, Спецсплав ЗАО

7. Неплавящиеся электроды

Авиасварка НТЦ, Инпрат ГВПП, «Победит» ОАО, Экспловелд СП

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Институт сварки России, Мидасот-Т ЗАО, Сварка и контроль НУЦ, Сепрозв ГП НТЦ

ПОДГОТОВКА И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ

ГАЦ МР НАКС ЗАО, Институт сварки России, Мидасот-Т ЗАО, МУАЦ ИЭС, Сварка и контроль НУЦ